

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

HERALDO TAKAO HASHIGUTI

ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO POR MEIO DA TÉCNICA TDR,  
UTILIZANDO A ANÁLISE DE RESÍDUOS

MARINGÁ  
2013

HERALDO TAKAO HASHIGUTI

ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO POR MEIO DA TÉCNICA TDR,  
UTILIZANDO A ANÁLISE DE RESÍDUOS

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, para obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Andrade Gonçalves.

MARINGÁ  
2013

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)**

H348e Hashiguti, Heraldo Takao  
Estimativa da umidade do solo por meio da técnica  
TDR, utilizando a análise de resíduos / Heraldo  
Takao Hashiguti. -- Maringá, 2013.  
58 f. : il. col., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Andrade  
Gonçalves.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Maringá, Centro de Ciências Agrárias, Departamento  
de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em  
Agronomia, 2013.

1. Solo - Água disponível. 2. Solo - Água  
disponível - Ajuste de modelos. 3. Solo - Constante  
dielétrica. 4. Água - TDR. I. Gonçalves, Antônio  
Carlos Andrade, orient. II. Universidade Estadual de  
Maringá. Centro de Ciências Agrárias. Departamento  
de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em  
Agronomia. III. Título.

CDD 21.ed. 631.587

ECSL-001283

# FOLHA DE APROVAÇÃO

HERALDO TAKAO HASHIGUTI

## ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO POR MEIO DA TÉCNICA TDR, UTILIZANDO A ANÁLISE DE RESÍDUOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Departamento de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

### COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. Antônio Carlos Andrade Gonçalves  
Universidade Estadual de Maringá (Presidente)

Prof. Dr. Paulo Sérgio Lourenço de Freitas  
Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Altair Bertonha  
Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Edson Eiji Matsura  
Universidade Estadual de Campinas

Aprovada em: 27 de fevereiro de 2013.

Local de defesa: Anfiteatro I, Bloco J-45, campus da Universidade Estadual de Maringá



## DEDICATÓRIA

Dedico, aos meus pais Katwiti Hashiguti e Mari Takeuchi Hashiguti, pelo imenso amor, educação, apoio incondicional em todos os momentos da minha vida, e por permitir que eu pudesse buscar todos os meus sonhos.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Maringá (UEM), em especial ao Departamento de Agronomia (DAG) e Programa de Pós-graduação em Agronomia (PGA);

Ao amigo Professor Dr. Antônio Carlos Andrade Gonçalves, pelo apoio e orientação neste trabalho, além da amizade, caráter, e contribuições à minha formação pessoal e profissional;

Aos meus brilhantes pai Katwiti Hashiguti e Mari Takeuchi Hashiguti, por todo amor, dedicação, e conselhos ao longo do meu crescimento;

Aos professores Dr. Roberto Rezende, Dr. Paulo Sérgio Lourenço de Freitas e Altair Bertonha;

Aos funcionários do Centro Técnico de Irrigação (CTI) pela amizade cultivada ao longo dos anos;

À secretária do Programa de Pós-graduação em Agronomia, Érika Cristina T. Sato, pela compreensão e atendimento profissional e competente durante este período de convivência;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro por meio da bolsa de estudos concedida;

Aos amigos membros do Centro de Treinamento de Irrigação (CTI/UEM) e do Núcleo de Pesquisa em Biotecnologia Aplicada (NBA/UEM) pela amizade e companheirismo durante este período;

E a todos que de alguma forma contribuíram para a execução deste trabalho.

Muito obrigado!

# ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO POR MEIO DA TÉCNICA TDR, UTILIZANDO A ANÁLISE DE RESÍDUOS

## RESUMO

A técnica da Reflectometria do Domínio no Tempo (TDR) tem se destacado em função da rapidez de leitura, da não perturbação do meio e da suposta confiabilidade da estimativa de umidade do solo. Apesar de inicialmente ter sido suposto que um único modelo, universal, seria adequado para relacionar a umidade do solo com a constante dielétrica aparente do solo ( $K_a$ ), a evolução do conhecimento em torno do assunto trouxe a compreensão de que a calibração é imprescindível. Para descrever a qualidade do modelo ajustado vários autores têm utilizados indicadores estatísticos de qualidade, mas apesar de toda esta estratégia de ação, uma avaliação centrada em uma análise de resíduos tem levado à compreensão de que erros de considerável expressão continuam a ocorrer. Este trabalho foi desenvolvido com o propósito de avaliar a qualidade de oito modelos empregados para descrever a relação entre umidade do solo e a sua correspondente constante dielétrica aparente, medida por meio da técnica da TDR. Dentre estes modelos, tem-se o modelo geral de Topp, o modelo desenvolvido por Gonçalves com a incorporação da densidade do solo ( $D_s$ ), o modelo de Ledieu, três modelos “importados” de outros trabalhos, ou seja, os de Tommaselli & Bacchi, Kaiser e Santos, um modelo polinomial juntamente com um modelo raiz, ajustados aos dados. Para esta avaliação, foram obtidos dados de um NITOSSOLO VERMELHO distroférico, em diferentes valores de  $D_s$ . A avaliação de qualidade foi feita de acordo com os critérios usuais descritos e por meio de uma análise de resíduos em relação aos modelos. Os resultados obtidos confirmaram que calibração local é imprescindível mas que, mesmo assim, os modelos que supostamente foram de qualidade adequada, ao serem submetidos a uma análise de resíduos, demonstraram dar origem a erros cuja magnitude atinge valores de ordem superior a 100% da água disponível no solo. Estes resultados evidenciam que, mesmo nas melhores circunstâncias, a TDR pode dar origem a erros incompatíveis com as necessidades operacionais, tanto em nível de pesquisa quanto em atividades de manejo no campo. Os indicadores estatísticos usualmente empregados para se avaliar a qualidade de ajuste de um modelo, estudados neste trabalho, revelaram-se insuficientes para atestar esta qualidade, uma vez que grandes erros de estimativa não foram detectados pelos mesmos.

**Palavras-chave:** Água disponível. Ajuste de modelos. Constante dielétrica.



# ESTIMATE OF SOIL MOISTURE THROUGH TECHNICAL TDR, USING THE ANALYSIS RESIDUES

## ABSTRACT

The Time Domain Reflectometry (TDR) technique has stood out due to the speed, non-disturbance of the medium and the supposed reliability of the estimate it provides. Though initially it was assumed that a single universal model would be appropriate to relate the soil moisture to the soil apparent dielectric constant ( $K_a$ ), the evolution of knowledge around the subject brought the realization that calibration is essential in this case. To describe the quality of the adjusted model several studies have used statistical indicators, but despite all this action strategy, an assessment centered in model estimates residue analysis, in relation to the values measured in several works, has led to the understanding that considerable expression errors continue to occur. Thus, this work was carried out with the purpose of evaluating the quality of eight models, using data from soil moisture and its corresponding  $K_a$ , measured by means of TDR technique. Among these models, it has been the general model of Topp, the model developed by Gonçalves with the incorporation of soil bulk density ( $B_d$ ), the model of Ledieu, three models "imported" from other works, ie, of the Tommaselli & Bacchi, Kaiser and Santos, and a polynomial model along with a root model fitted to the data. For this evaluation, obtained in a Dystriferric Red Ultisol under different values of soil bulk density ( $B_d$ ). The quality evaluation was conducted according to the usual criteria and described by a residue analysis from the models. The results confirmed that local calibration is crucial, but even so, the models that allegedly showed adequate quality, when subjected to residue analysis, showed errors whose magnitude reaches order values greater than 100% of the available water in the soil. These results show that even under the best circumstances, the TDR can lead to mistakes incompatible with operational requirements, both at research level and in management activities in the field. The statistical indicators commonly employed to evaluate the quality of the adjustment of a model studied in this work, proved insufficient to attest this quality, since large estimation errors were not detected by them.

**Keywords:** Adjustment of models, Available water, Dielectric constant

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Curva de retenção de água no solo de um NITOSSOLO VERMELHO distroférico (TRINTINALHA, 2000). .....	14
Figura 2 –	Relação entre umidade do solo e correspondente valor de $K_a$ , para os modelos utilizados. ....	22
Figura 3 –	Valores de $\theta$ observados ( $\theta_O$ ) e estimados ( $\theta_E$ ) pelos modelos e modelo linear ajustado aos pares de valores para os modelos. ....	25
Figura 4 –	Valores dos desvios médios relativos dos modelos lineares ajustados, para os oito modelos adotados. ....	28
Figura 5 –	Valores dos desvios relativos dos modelos. ....	30
Figura 6 –	Diagramas “box-plot” dos valores dos desvios relativos para cada modelo. ....	31
Figura 7 –	Valores de $\theta$ observados ( $\theta_O$ ) e estimados ( $\theta_E$ ) pelo modelo M1, modelo linear ajustado ( $y=a.x+b$ ) aos pares de valores, coeficiente angular (a), coeficiente linear (b) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para cada densidade do solo. ....	36
Figura 8 –	Valores de $\theta$ observados ( $\theta_O$ ) e estimados ( $\theta_E$ ) pelo modelo M2, modelo linear ajustado ( $y=a.x+b$ ) aos pares de valores, coeficiente angular (a), coeficiente linear (b) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para cada densidade do solo. ....	38
Figura 9 –	Valores de $\theta$ observados ( $\theta_O$ ) e estimados ( $\theta_E$ ) pelo modelo M3, modelo linear ajustado ( $y=a.x+b$ ) aos pares de valores, coeficiente angular (a), coeficiente linear (b) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para cada densidade do solo. ....	40
Figura 10 –	“Box-plot” dos desvios relativos médios para os modelos M4, M5 e M6 para cada densidade do solo ( $D_s$ ). ....	44
Figura 11 –	“Box-plot” dos desvios relativos médios para os modelos M1, M2, M3, M7 e M8 para cada densidade do solo ( $D_s$ ). ....	46
Figura 12 –	Valores do Índice de desempenho (c) por densidade do solo ( $D_s$ ), para cada modelo. ....	47
Figura 13 –	“Box-plot” dos desvios relativos para os modelos M1, M2, M3, M7 e M8 para cada valor da densidade do solo ( $D_s$ ). ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constantes dielétricas ( $K_a$ ) de constituintes do meio poroso.....	5
Tabela 2 – Equações dos modelos empregados para descrever a relação entre umidade do solo e a sua correspondente constante dielétrica aparente. ....	16
Tabela 3 – Critérios para análise de desempenho de um modelo por meio do índice c. ....	18
Tabela 4 – Coeficientes obtidos por meio de regressão linear, coeficiente de determinação e significância para os modelos raiz e polinomial ajustados aos dados obtidos. ....	21
Tabela 5 – Resumo estatístico dos valores medidos da umidade do solo, $\theta$ ( $m^3m^{-3}$ ) da constante dielétrica, $K_a$ , e da densidade do solo, $D_s$ ( $Mgm^{-3}$ ). ....	21
Tabela 6 – Análise de variância para as séries de valores de umidade do solo. ....	23
Tabela 7 – Valores médios de umidade nas séries comparadas e resultado da aplicação do teste de Tukey.....	23
Tabela 8 – Coeficiente angular (a), linear (b) e de determinação ( $R^2$ ) para os oito modelos.	26
Tabela 9 – Índice de Willmott (d), de correlação (r) e de desempenho (c) para os oito modelos. ....	27
Tabela 10 – Resumo estatístico dos desvios médios relativos (%) obtidos com o emprego dos oito modelos. ....	29
Tabela 11 – Resumo estatístico dos valores dos desvios relativos (%) obtidos para os oito modelos. ....	32
Tabela 12 – Resumo estatístico dos valores medidos da umidade do solo, $\theta$ , ( $m^3m^{-3}$ ) e da constante dielétrica, $K_a$ , para cada densidade do solo, $D_s$ , ( $Mgm^{-3}$ ). ....	34
Tabela 13 – Coeficientes obtidos por meio de regressão linear e coeficiente de determinação para os modelos raiz e polinomial ajustados aos dados obtidos para cada valor de densidade do solo. ....	35
Tabela 14 – Coeficientes angular, linear e de determinação para os modelos M4 a M8 em cada densidade do solo ( $D_s$ ). ....	42
Tabela 15 – Índice de Willmott (d), de correlação (r) e de desempenho (c) para os modelos M4, M5 e M6 em cada densidade do solo ( $D_s$ ). ....	45
Tabela 16 – Número de leituras de umidade e de respectivo valor de $K_a$ necessários para se obter um determinado erro amostral, em um nível de confiança empregado. ....	49

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	1
REVISAO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO (TDR).....	4
2.1.1 Construção de sondas .....	6
2.1.2 Calibração.....	9
2.1.3 Modelos .....	11
MATERIAL E MÉTODOS.....	13
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	21
4.1 DADOS GERAIS .....	21
4.2 AVALIAÇÃO EM CADA VALOR DE DENSIDADE .....	33
4.2.1 Avaliação da distribuição dos desvios de cada modelo.....	43
CONCLUSÕES .....	51
REFERÊNCIAS .....	52

## INTRODUÇÃO

O conhecimento do valor da umidade do solo, em um determinado momento, em um local de interesse, é essencial para o estabelecimento de estratégias de manejo de água em um sistema agrícola, o que tem promovido a busca por métodos eficazes para a sua avaliação. Entre os vários métodos desenvolvidos para a estimativa do conteúdo de água no solo ( $\theta$ ), destaca-se a técnica de reflectometria no domínio do tempo ou *time domain reflectometry* (TDR), que mede a constante dielétrica do solo ( $K_a$ ), cujo valor é relacionado com os valores de  $\theta$ . A TDR foi empregada em meios porosos desde que Topp et al. (1980) propuseram uma relação empírica entre estas variáveis.

A evolução do conhecimento acerca do emprego desta técnica, contudo, levou à compreensão de que diversas características físicas locais do solo podem induzir a erros de estimativa da umidade do solo. Em função da compreensão estabelecida por inúmeros trabalhos de que as condições locais podem influenciar na leitura da TDR, não foi possível até o momento, a identificação de um único modelo robusto e exato, com base física, o que promoveu o surgimento de grande número de modelos empíricos de calibração para a TDR.

Diversos autores têm procurado estabelecer modelos adequados às mais diversas condições, para solos do Brasil, assim como de diversos outros países. Tradicionalmente, os trabalhos conduzidos com este propósito, ao longo das últimas décadas, tem se baseado em indicadores de qualidade de ajuste baseados apenas na significância estatística dos coeficientes dos termos dos modelos ajustados aos valores medidos. Além disto, consideram o valor do coeficiente de determinação decorrente do ajuste estatístico do modelo como uma expressão da qualidade do mesmo, no que se refere à sua precisão. Em trabalhos mais recentes, registra-se a utilização de outros indicadores de qualidade do ajuste, assim como da habilidade do modelo em descrever o processo em estudo. Indicadores como o índice “d” de Willmott (1981) tem sido empregado como um indicador da exatidão das estimativas, assim como o índice de desempenho “c”, obtido com a associação do “d” com o coeficiente de correlação “r”, tem sido empregado como indicador adicional da precisão e da exatidão das estimativas. Assim como em estudos envolvendo processos em algumas áreas de conhecimento, nas quais estes índices têm sido tradicionalmente empregados, também em trabalhos envolvendo TDR este emprego tem permitido uma melhor seleção de modelos que se mostram mais adequados. No entanto, mesmo com o emprego destes, ainda se pode observar que a estimativa feita com a TDR pode conter erros consideráveis em relação aos

valores de umidade do solo medidos, o que demanda maior compreensão em relação à capacidade dos modelos em descrever o fenômeno que ocorre na natureza, relacionando a umidade do solo com a constante dielétrica aparente medida, nas diversas condições operacionais possíveis.

Estudos mais elaborados e indicadores de qualidade mais eficazes ainda se fazem necessários, para que esta técnica possa ser utilizada com a segurança necessária, em trabalhos de campo, assim como em atividades de pesquisa. Apesar de toda esta estratégia de ação, uma avaliação centrada em uma análise de resíduos das estimativas dos modelos em relação aos valores medidos tem levado à compreensão de que erros de considerável expressão continuam a ocorrer, neste processo de estimativa.

Este trabalho foi desenvolvido com o propósito de avaliar a qualidade de oito modelos empregados para descrever a relação entre umidade do solo e a sua correspondente constante dielétrica aparente, medida por meio da técnica da TDR.

## REVISAO BIBLIOGRÁFICA

O manejo da água em áreas cultivadas é uma das atividades humanas de maior relevância em termos da produção mundial de alimentos. Por meio do manejo racional dos recursos envolvidos, o objetivo da agricultura irrigada é a obtenção de uma produção economicamente viável, procurando maximizar o retorno do investimento realizado.

Para o manejo racional da irrigação é essencial a determinação da umidade do solo, que constitui uma importante informação para a tomada de decisões de natureza técnica e financeira (ANDRADE et al., 2003) e, ainda, para qualquer estudo que envolva as propriedades do sistema solo-planta-atmosfera. Então, a variável fundamental para o estudo e modelagem de diferentes processos ambientais, agronômicos e hidrológicos é a umidade do solo. Com a determinação da umidade do solo têm-se, por exemplo, informações necessárias sobre a situação de estresse hídrico da planta.

A umidade do solo, embora seja um conceito relativamente simples, apresenta dificuldades envolvidas na sua determinação direta. Um dos entraves para se obter um valor representativo está na inerente variabilidade espacial e temporal das características físicas do solo (GONÇALVES et al., 1999).

A faixa de umidade disponível para as plantas é definida pelo intervalo compreendido entre a capacidade de campo (cc) e o ponto de murcha permanente (pmp). Tais pontos são tradicionalmente considerados como os limites máximo e mínimo, respectivamente, de água disponível (AD) (REICHARDT & TIMM, 2004; LIBARDI, 2005).

Os limites superior e inferior de  $\Psi$  de -60 hPa e de -15.000 hPa definem, respectivamente, a capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ) (REICHARDT, 1988). Esses valores têm sido adotados, por diversos autores, tais como Blainski et al. (2009) e Trintinalha (2000), para um NITOSSOLO VERMELHO distroférico, típico da região noroeste do estado do Paraná.

Os métodos de determinação da umidade do solo são classificados como diretos ou indiretos. Os métodos diretos geralmente são destrutivos, pois envolvem alguma forma de remoção ou separação da água da matriz do solo, medindo diretamente a quantidade de água removida. Essas medidas podem ser obtidas pelo método termogravimétrico, considerado padrão, porém esse é um método trabalhoso e de ação lenta (GONÇALVES, et al. 2011). Dessa forma, este método é evitado por não permitir a repetição da amostragem no mesmo local.

Os métodos indiretos são aqueles por meio dos quais se torna possível determinar a quantidade de água presente nos solos utilizando-se medidas indiretas das características dos mesmos, relacionadas com a umidade, como a constante dielétrica, condutividade elétrica, capacidade térmica ou susceptibilidade magnética (MANIERE et al., 2007).

Como métodos indiretos que determinam alguma propriedade física ou química relacionado ao conteúdo de água do solo, podem ser citados os seguintes: sonda de nêutrons, resistência elétrica (SOUZA et al., 2002), tomografia computadorizada com raios-X e raios gama ( $\gamma$ ), ressonância magnética, Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), ECHO, capacidade térmica, conteúdo de hidrogênio ou susceptibilidade magnética (TOPP & FERRÉ, 2002; TRINTINALHA et al., 2004). Dentre eles, o emprego da técnica da TDR tem ganhado espaço nas últimas décadas, em função da qualidade das estimativas realizadas.

## 2.1 REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO (TDR)

Dentre os diversos métodos desenvolvidos para a determinação da umidade do solo ( $\theta$ ), destaca-se a técnica de *time domain reflectometry* (TDR) ou reflectometria no domínio do tempo, que mede a constante dielétrica aparente do solo ( $K_a$ ), cujo valor é relacionado com os valores de  $\theta$ .

Esta metodologia foi desenvolvida, inicialmente, por Fellner-Feldegg (1969) para se obter, através de uma única medida (velocidade de propagação de um pulso eletromagnético), a dependência da frequência do pulso em função da constante dielétrica dos líquidos, dos tempos de relaxação das moléculas e da condutibilidade elétrica. Segundo os mesmos autores, essa técnica consiste em se medir o tempo de percurso de um pulso eletromagnético ao longo de um caminho, constituído por uma sonda, de comprimento conhecido, para a onda. Este tempo de percurso está relacionado com a constante dielétrica média do meio no qual a sonda guia é inserida.

Topp et al. (1980) relatam que há várias possibilidades de aplicação da técnica TDR, mas a de maior utilidade, do ponto de vista agrônomico, é a de determinação do conteúdo de água do solo. Outros, como Dalton et al. (1984), Dalton & Van Genuchten (1986) e Nadler et al. (1991), aplicam o método na determinação da condutibilidade elétrica dos solos, com vistas à avaliação da salinidade da solução do solo.

Usando o modelo de calibração desenvolvido por Herkelrath & Hamburg (1991) Hook & Livingston (1996) derivaram, fisicamente, uma equação na qual o conteúdo volumétrico de água estava linearmente relacionado com o tempo de deslocamento do sinal de



TDR. Tommaselli & Bacchi (2001) vêm confirmar esse estudo apresentando que para a utilização da técnica TDR, na determinação do conteúdo de água do solo, seria apenas necessário introduzir duas hastes de aço de comprimento conhecido no solo, emitir um pulso de voltagem ao longo destas hastes e medir o seu tempo de deslocamento para posterior cálculo da constante dielétrica.

Considerando que o solo é um material dielétrico a ser medido, deve-se lembrar que a  $K_a$  do meio refere-se a uma média ponderada das constantes dielétricas das fases sólida, líquida e gasosa, ou seja, das frações dos componentes do solo (SANTOS et al., 2012). A Tabela 1 apresenta os valores de constantes dielétricas de diversos materiais presentes no meio poroso conforme Noborio (2001).

Tabela 1 – Constantes dielétricas ( $K_a$ ) de constituintes do meio poroso.

Meio	$K_a$
Ar	1
Água (20°C)	80
Gelo (-5°C)	5
Basalto	12
Granito	7 - 9
Arenito	9 - 11
Argila seca	3,5
Areia seca	2,5

Mas, na prática, a  $K_a$  é determinada utilizando um equipamento constituído basicamente de um emissor de pulso, cabos, sondas (normalmente com duas ou três hastes) e um interpretador de sinal, que percebe a emissão e a chegada do pulso eletromagnético refletido, determinando assim o tempo de percurso ( $t$ ) através das hastes com comprimento  $L$  (LACERDA et al., 2005). A constante dielétrica aparente do solo (adimensional) pode ser calculada conforme a equação 1.

$$K_a = \left( \frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (1)$$

em que,

$K_a$  – constante dielétrica aparente do solo (adimensional)

$c$  – velocidade da luz no vácuo ( $30 \text{ cm ns}^{-1}$ )

$t$  – tempo de percurso (ns)

$L$  – comprimento da haste (cm)

Várias pesquisas foram realizadas para verificar as alterações na constante dielétrica do solo. Hoekstra & Delaney (1974) e Davis & Annan (1977) constataram que havia uma forte dependência da  $K_a$  em relação a  $\theta$ , maior que em relação à composição e à densidade do solo. Topp et al. (1980), estudando cinco tipos de solo, confirmaram, posteriormente, que noventa e três por cento das variações da constante dielétrica devia-se ao conteúdo de água do solo. Estes estudos ainda sugeriram que fatores como temperatura, tipo de solo, densidade do solo e conteúdo de sal tinham efeito menores quando comparados ao conteúdo de água do solo.

A utilização dessa técnica tem se difundido e ocasionado uma contribuição primordial para os estudos da relação água-solo-planta-atmosfera. Os valores de  $K_a$  apresentam alta sensibilidade à variação do conteúdo de água do solo, o que conduz a uma precisão na identificação da variação da umidade do solo, que torna a técnica TDR muito conveniente para as aplicações que envolvem manejo de água (TRINTINALHA et al. 2001).

Além de estimativas de umidade, a TDR viabiliza o monitoramento contínuo, para descrever a distribuição espacial e temporal de água no perfil do solo (COELHO & OR, 1999; RODRIGUES et al., 2001; SOUZA et al., 2007; VIEIRA et al, 2008; ), a obtenção da curva de retenção de água no solo por meio da utilização conjunta com tensiômetros (OTTO & ALCAIDE, 2001; TAVARES et al., 2008), a verificação de variabilidade espacial do armazenamento e perda média diária de água pelo solo (SIQUEIRA et al., 2008). Também permite analisar os efeitos de manejo cultural na formação de estruturas do solo e na formação de fluxo preferencial de água, fazendo-se uso de fotografias, de seções escavadas no solo com corantes, que disponibilizam alta resolução espacial e leituras de TDR que disponibilizam alta precisão temporal (BACHMAIR et al., 2009).

A tecnologia da TDR tem melhorado, porém continua cara e ainda a acurácia não se compara à sonda de nêutrons (EVANS et al., 2012), mas para Lima et al. (2006) a técnica da TDR pode ser utilizada em sua substituição, já que esta não utiliza fonte nuclear, pode ser instalada em várias profundidades e em vários locais no solo, além de possibilitar a realização de leituras automatizadas.

O grande número de sondas necessário para o monitoramento da variabilidade espacial e temporal da umidade do solo torna elevado o custo desta técnica.

### **2.1.1 Construção de sondas**

Fez-se necessário, portanto, produzir, a baixo custo, sondas para o monitoramento da

umidade (ANDRADE et al., 2003). O uso da técnica da TDR para estimar a umidade do solo tem sido limitado pelo custo, tanto do testador de cabo como da sonda (SOUZA & MATSURA, 2002). As sondas fornecidas por fabricantes com base em TDR são de custo elevado, o que dificulta sua aquisição (COELHO et al., 2001). Então, por apresentarem um custo mais baixo que as sondas comercializadas, os usuários da técnica da TDR têm usado sondas de construção própria (COELHO et al., 2003).

Com a possibilidade de construção própria de sondas, a diversidade de tamanhos, formas e matérias utilizadas são imensas. Desta maneira, a questão referente aos tipos de sondas que seriam mais adequadas para a estimativa de umidade do solo, tem sido muito abordada em diferentes trabalhos, como de Souza & Matsura (2002), Cichota & Lier (2004), Souza et al. (2006), entre outros.

Andrade et al. (2003) descrevem que existem, basicamente, três tipos de sondas: 1) com duas hastes, permitindo que se instalem em vários pontos e se utilize uma conexão móvel para leitura em vários locais; 2) com duas ou três hastes de conexão com o cabo permanente; 3) com haste segmentada, inserida verticalmente no solo.

As sondas constituídas de hastes contínuas de aço inoxidável apresentam a desvantagem de ter uma limitação do uso em profundidade (SOUZA & MATSURA, 2002), pois quando são feitas medidas da umidade ao longo do perfil do solo, ocorre a necessidade de instalação de grande número de sondas (MANIERI et al., 2007).

Frueh & Hopmans (1997) concluíram que sondas multi-segmentadas permitem a automatização das medidas de umidade do solo em diferentes níveis de profundidade. Isto torna possível o estudo de mudanças espaciais e temporais no conteúdo de água do solo. Souza & Matsura (2002) recomendam uma segmentação máxima de 4 trechos, para a sonda multi-segmentada, visto que existe dificuldade na interpretação dos picos de impedância quando foi utilizado um número elevado de segmentações, que elevaram consideravelmente as reflexões do sinal.

Posteriormente Cichota & Lier (2004) verificam que a utilização de sondas de hastes multi-segmentadas para estimar umidade do solo no campo, não é viável, pois ocorre alta variação das curvas de calibração entre os conjuntos de dados analisados.

Manieri et al. (2007) apresentam como alternativa, para determinação de umidade no perfil de solo, sondas espirais que apresentam como vantagem a não necessidade de trincheiras para sua colocação na profundidade desejada, ou seja, de forma não-invasiva e rápida. Segundo, ainda, estes autores, a sonda em espiral apresenta resultados semelhantes aos observados com sondas de hastes contínuas em que a constante dielétrica aumenta com o

aumento da umidade, porém com menores valores de  $K_a$ .

Souza et al. (2006) construíram 3 tipos de sondas, sonda contínua com 3 hastes, sonda multi-haste segmentada e sonda coaxial de volume variável, com materiais nacionais. Estas sondas se apresentaram como alternativa às sondas comerciais na estimativa da umidade e da condutividade elétrica no solo.

Para os diferentes materiais necessários para a construção de sondas, do ponto de vista técnico-econômico, é viável a utilização de hastes de latão no lugar de aço inoxidável (SOUZA & MATSURA, 2002). Coelho et al., (2001) e Coelho et al., (2003) verificaram que sondas com capacitores e sem capacitores apresentam estimativas semelhantes. Coelho et al. (2005) constataram que, para o funcionamento correto das leituras de  $K_a$ , faz-se necessário o uso de um resistor de  $15 \Omega$  em série com a haste central nas guias de onda. Posteriormente, Coelho et al. (2006) verificaram que sondas construídas com capacitores tem melhor desempenho que sondas construídas com resistores.

Com a finalidade de adequar as sondas aos meios variáveis, ocorreram diversas configurações entre a distância e comprimento das hastes. Foi constatado que a variação do espaçamento entre hastes não interfere na constante dielétrica da água (COELHO et al., 2001; COELHO et al., 2003), e sim os diferentes comprimentos de hastes apresentam variações para os valores de  $K_a$  (PEREIRA et al., 2006; MANIERI et al., 2007; SANT'ANA et al., 2012) observaram que para obtenção de medidas exatas, o tamanho das hastes deve ser de no mínimo 10 cm, no caso de sondas com hastes de aproximadamente 3 mm.

A comparação direta de sondas construídas e sondas originais foi realizada por Milani et al. (2008), os autores verificaram através da comparação dos coeficientes das equações de cada sonda, que as sondas construídas são semelhantes às sondas originais do fabricante.

Mesmo com as distintas configurações de formas, comprimentos de hastes e materiais utilizados, as sondas construídas apresentaram-se aptas para estimar o conteúdo de água no solo.

Com a evolução do conhecimento acerca do emprego desta técnica, contudo, levou à compreensão de que diversas características locais podem induzir a erros de estimativa da umidade do solo (SILVA & GERVÁSIO, 1999; TEIXEIRA et al., 2003; LACERDA et al. 2005).

O erro de estimativa de umidade do solo pela TDR, segundo Skierucha (2000) está relacionado a três fatores: o erro de calibração, a qualidade de instalação das sondas e o erro de leitura do tempo de deslocamento do pulso eletromagnético, causado pelo próprio sistema

eletrônico do dispositivo. Não há como intervir no erro de leitura causado pelo próprio dispositivo, mas para os erros ocasionados por calibração e instalação de sondas, pode-se aumentar ou diminuir esses erros dependendo da qualidade de calibração e de instalação. E no caso de sondas construídas, pode apresentar um quarto fator, de erro de estimativa, a qualidade da sonda.

### **2.1.2 Calibração**

Existem vários trabalhos que relatam o efeito das variáveis externas sobre o funcionamento da TDR, como os de Hoeskstra & Delaney (1974), Davis & Annan (1977) e Coelho et al. (2001). Eles concluíram que a composição da textura do solo, com base em suas medidas, tem uma influência mínimas na constante dielétrica do solo úmido. Por outro lado, os dados de outros autores, tais como Wang (1980) e Newton (1977), mostram diferenças significativas na magnitude da constante dielétrica relativa para diferentes solos ao mesmo nível de umidade.

Tommaselli & Bacchi (2001) estudando cinco solos da região de Piracicaba – São Paulo – Brasil, Areia Quartzosa, Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Escuro, Podzólico Vermelho-Amarelo e Terra Roxa Estruturada, mostraram que a curva de calibração imbutida no aparelho de TDR não se ajustou aos dados e que, desse modo, deveriam ser feitas calibrações empíricas distintas para cada tipo de solo.

Pepin et.al. (1995), investigando a influência da temperatura sobre as medidas do conteúdo de água pela técnica do TDR, concluíram que para solo com umidade relativamente alta é necessária uma correção da  $K_a$ .

Weast (1986) relata que a  $K_a$  decresce com o aumento da temperatura. Por outro lado, para Coelho et al. (2005) a  $K_a$  varia linearmente e positivamente com a temperatura. Porém, Persson & Berndtsson (1998) esclarecem que não devem ser notados erros associados às mudanças de temperaturas, pois são pequenos em relação aos outros. Diversos estudos têm mostrado que o efeito da temperatura é menor quando comparado com outros erros de calibração (Ledieu et al., 1986; Roth et al., 1990).

Tommaselli & Bacchi (2001) constataram que, além da água, a distribuição do tamanho de partículas, teor de óxido de ferro, teor de matéria orgânica e superfície específica são características que podem influenciar o valor da constante dielétrica do solo. Villwock et al. (2004) enfatiza que a calibração da técnica TDR é exigida em especial quando se trabalha com latossolos e suas particularidades como o alto teor de ferro (da ordem de  $70 \text{ mgdm}^{-3}$ ),

alto teor de argila (maior do que 60%) e expansibilidade.

Roth et al. (1992) comprovaram que são necessárias calibrações diferentes para solos com minerais ferrosos ou orgânicos.

Estudos mais recentes, como de Gonçalves et al. (2011) comprovaram que o efeito da densidade do solo sobre a Ka é altamente significativo.

Para a instalação das sondas, Trintinalha et al. (2001) verificaram que a umidade do solo no momento da instalação pode influenciar na leitura de Ka, uma vez que pode interferir no contato solo – sonda. Este contato pode modificar os valores de Ka, pois segundo Schneider & Fratta (2009) para valores de umidade próximos da saturação ocorre a influencia da porosidade do material próximo da sonda sobre as leituras de Ka.

Para diversos autores, como Serrarens et al. (2000), Annandale et al., (2003) e Cichota & Lier (2004) a calibração da TDR é em grande parte controlada pela instalação da sonda e especificamente influenciada pelo grau de contato físico entre sondas e o material em torno delas, e pela compactação do solo. Quando o contato da terra com a sonda for incompleto, o ar faz com que as leituras sejam reduzidas alterando representativamente os valores da Ka.

Diante dos fatores citados, verifica-se a necessidade de calibração do equipamento nas condições locais e um cuidado adicional na instalação de sondas. Uma vez que a medida da Ka utilizando o equipamento que utiliza a técnica TDR é pontual, ou seja, traduz a condição de umidade existente ao redor da sonda (BARBOSA et al., 2010), tais cuidados são indispensáveis.

A técnica TDR quando calibrada, permite a determinação de  $\theta$ , in situ, com resultados similares aos do método gravimétrico (TEIXEIRA et al., 2003). Deve-se ressaltar que para cada solo, se faz necessário uma específica calibração (TOMMASELLI & BACCHI, 2001; TRINTINALHA et al., 2004; KAISER et al., 2010). Conforme Pereira et al. (2006), essa é a maior dificuldade para a utilização da técnica TDR, pois não há um método de calibração considerado padrão. São vários métodos de calibração citados na literatura.

Alguns autores apresentam metodologias de calibração distintas, tais como Cecílio & Santos (2009) que utilizaram uma metodologia de calibração baseado na secagem do solo em estufa e uma pequena quantidade de solo, tornando possível, desta forma, ajustar uma curva de calibração de equipamentos de TDR. A posteriori Santos et al. (2012) apresentaram duas metodologias de calibração, uma em que o solo já é preparado em diversas umidades e outra na qual o solo é saturado e a calibração só é encerrada quando este atinge umidade constante.

No processo de calibração, para estimativas de  $\theta$ , não há diferença no ângulo de

inserção da sonda (TEIXEIRA et al., 2003), que faz leituras com as sondas instaladas tanto no sentido horizontal quanto no vertical (TRINTINALHA et al., 2004).

Conforme Coelho et al. (2001) e Santos et al. (2010) pode-se realizar a calibração do equipamento TDR, tanto em amostras de solo deformadas, quanto não deformadas. Segundo os mesmos autores, o tipo da amostra de solo não interfere nos valores do conteúdo volumétrico de água no solo para um mesmo valor da constante dielétrica do solo.

Na busca da qualidade das estimativas realizadas por meio da técnica TDR, com a intenção de evitar erros graves, diferentes modelos de calibração têm sido propostos.

### **2.1.3 Modelos**

A TDR foi empregada em meios porosos desde que Topp et al. (1980) propuseram uma relação empírica entre a umidade do solo e a constante dielétrica. Kameyama & Miyamoto (2008) apresentam esta relação destacando que estes coeficientes numéricos poderiam ser assumidos como universais.

Os modelos de estimativas de umidade utilizando a técnica da TDR podem ser de natureza empírica (TOPP et al., 1980) ou física, que envolvem modelos dielétricos mistos.

Os modelos empíricos são apenas relações funcionais entre  $K_a$  e  $\theta$ , sendo que  $\theta$  é dependente apenas de  $K_a$ , não havendo um significado físico para a relação encontrada. Desta maneira esses modelos tem sua aplicabilidade limitada aos dados de origem, mas que eventualmente podem ajustar-se bem a condições semelhantes (TOMMASELLI & BACCHI, 2001).

Os modelos de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) têm sido muito utilizados, estando inseridos nos equipamentos de TDR de alguns fabricantes, porém são empíricos e não levam em consideração os efeitos das propriedades físicas do solo, razão pela qual podem não ser os mais adequados (SANTOS et al., 2010).

Silva & Gervásio (1999) com base em determinações e observações de campo, suspeitaram do uso do modelo de Topp et al. (1980) para os solos brasileiros, decidindo por elaborar uma equação específica para cada um dos diferentes tipos de solo encontrados no país. Em solos brasileiros, Tommaselli & Bacchi (2001) e Coelho et al. (2006) mostram que não é possível uma generalização do modelo de calibração. Kaiser et al. (2010) identificaram a inadequação dos modelos gerais propostos, evidenciando a necessidade de modelos específicos para cada solo.

Gonçalves et al. (2011) ressaltam que a utilização de um modelo que não leve em

conta a  $D_s$  pode levar a erros de avaliação da umidade do solo de grande magnitude, em relação ao valor da disponibilidade de água do solo.

Segundo Robinson et al. (2005), a ausência de um modelo exato com base física, promoveu o surgimento de grande número de modelos empíricos de estimativas de umidade através da técnica da TDR.

Vários autores (COELHO et al., 2003; COELHO et al., 2006; KAISER et al., 2010; SANTOS et al., 2012) avaliaram a estimativa de umidade obtida por meio de modelos empíricos, em comparação a estimativa realizada com modelo ajustado aos seus dados experimentais. Diversos modelos foram encontrados para diferentes solos, em um Latossolo Amarelo Distrófico, o melhor modelo ajustado foi um modelo exponencial (COELHO et al., 2001), para um Latossolo Vermelho Ácrico Típico o melhor ajuste foi o modelo linear (SANTOS et al., 2010), em um Latossolo Vermelho-Amarelo um modelo de potência é o modelo que melhor se adequa na estimativa da umidade do solo (ALMEIDA et al., 2012).

O modelo mais utilizado por diversos autores (SILVA & GERVÁSIO, 1999; TOMMASELLI & BACCHI, 2001; TRINTINALHA et al., 2001; VILLWOCK et al., 2004; SOUZA et al., 2007; MILANI et al., 2008; KAISER et al., 2010; SANTOS et al., 2010; GONÇALVES et al., 2011; SANT'ANA et al., 2012; SANTOS et al., 2012) é um modelo polinomial, parecido com o modelo de Topp et al. (1980), porém com os coeficientes determinados experimentalmente.

Para diferir os modelos entre si, vários autores têm utilizado o teste F de uma análise de variância e também testes de médias. Empregando estes recursos, os autores têm constatado que uma calibração e ajuste de um modelo para cada local é necessária, pois os modelos empíricos se mostram diferentes.

Esses modelos ajustados têm sua qualidade verificada, normalmente, por validações estatísticas, considerando a significância dos coeficientes do modelo ajustado e o coeficiente de determinação obtido no ajuste, o que expressa a habilidade do modelo em descrever os valores obtidos. Outro indicador de qualidade, denominado índice de desempenho “c”, tem sido empregado em diferentes trabalhos, nos últimos anos. Este índice avalia o desempenho dos modelos em relação a valores padrões e é calculado a partir dos coeficientes de correlação e de concordância, conforme discutido em Willmott (1981). O emprego destes indicadores na avaliação da qualidade dos modelos tem representado considerável avanço, uma vez que tanto a precisão quanto a exatidão do modelo têm sido consideradas nesta avaliação.



## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na área experimental do Departamento de Agronomia da UEM. A partir de material coletado no campo, preparou-se terra fina seca ao ar (TFSA) obtida do NITOSSOLO VERMELHO distroférico ali presente, o qual apresenta horizonte A moderado, textura argilosa e é comumente encontrado na região noroeste do estado do Paraná. Com o material da profundidade de 0 – 60 cm foram preenchidos recipientes, nos quais foram medidos em laboratório os valores de umidade do solo ( $\theta$ ) e da respectiva constante dielétrica ( $K_a$ ), conforme metodologia descrita por Trintinalha (2000).

Cada recipiente era composto por cilindros de PVC com diâmetro nominal de 0,10 e 0,25 m de altura, sob os quais se colou uma base circular plana, também de PVC. A massa de solo colocada em cada recipiente variou entre 2 e 4 kg, conforme a densidade estabelecida no seu interior.

O preenchimento dos recipientes com TFSA foi realizado de forma a se promover diferentes valores de densidade do solo, aproximadamente de 0,9 e 1,4 Mg m<sup>-3</sup>, em cada um deles. Em seguida, os 14 recipientes empregados foram saturados, sendo posteriormente colocados para drenar o excesso de água. A partir deste momento, foram realizadas medidas da umidade do solo, gravimetricamente, e medidas da constante dielétrica aparente do meio, por meio do equipamento 6050X1 TRASE SYSTEM I, efetuada com o emprego de uma sonda de três hastes, com 0,2 m de comprimento, inserida no interior de cada recipiente. Foi monitorado um ciclo de secagem do material nos 14 recipientes empregados, o que gerou 624 valores experimentais.

Este solo apresentou como sua composição 756,8 gkg<sup>-1</sup> de argila, 120,6 gkg<sup>-1</sup> de silte e 122,6 gkg<sup>-1</sup> de areia e a curva de retenção de água do solo em questão, apresentada na Figura 1, foi obtida por Trintinalha (2000). Nessa curva, verifica-se que o valor de 0,44 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> corresponde ao potencial matricial da ordem de - 6,0 kPa, o qual foi tomado como sendo correspondente à capacidade de campo. Admitiu-se como a umidade correspondente ao ponto de murcha o valor de 0,34 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, que corresponde ao potencial de -1500 kPa. Assim, a água disponível (AD) ou disponibilidade total de água (DTA) neste solo, é da ordem de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, o que corresponde a 1,0 mm de água por centímetro de profundidade de solo (1,0 mm cm<sup>-1</sup> = 0,1 m m<sup>-1</sup>). Portanto, é nesta faixa de valores de umidade do solo que as medidas são de maior importância para os objetivos agronômicos.

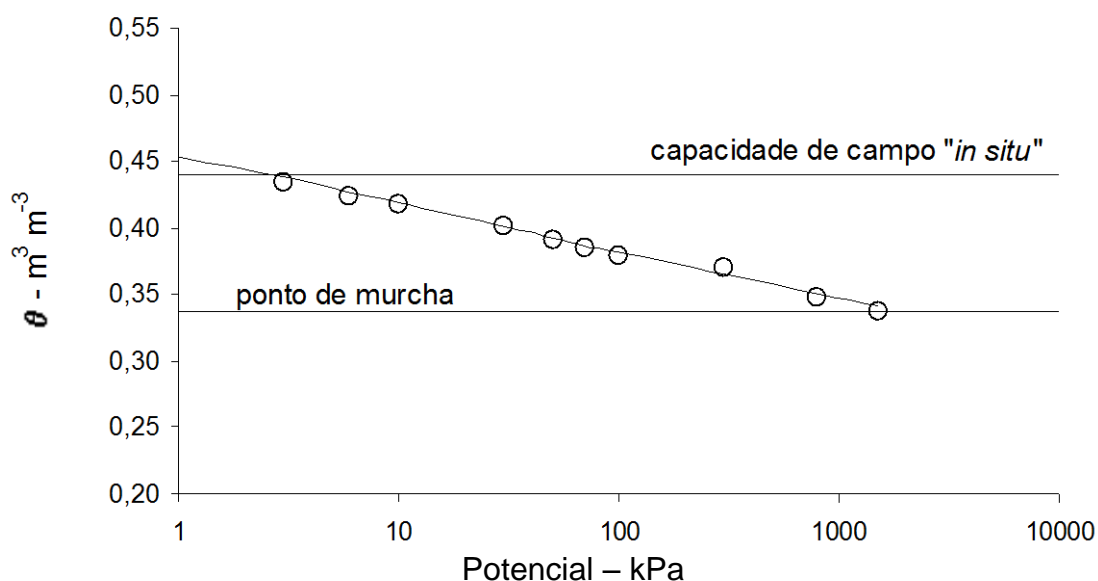


Figura 1 – Curva de retenção de água no solo de um NITOSSOLO VERMELHO distroférico (TRINTINALHA, 2000).

A partir dos valores medidos de umidade e de constante dielétrica foram ajustados modelos matemáticos para descrever a relação entre estas grandezas, ao longo do ciclo de secagem do meio poroso. Foram empregados alguns modelos oriundos de outros trabalhos, como os modelos de Gonçalves et al. (2011), Topp et al. (1980), Ledieu et al. (1986), Tommaselli & Bacchi (2001), Kaiser et al. (2010), Santos et al. (2012). Também foram ajustados outros modelos aos dados. Dentre estes, ajustou-se um modelo que relaciona a umidade com a raiz da constante dielétrica aparente e um modelo polinomial de segundo grau.

O modelo de Gonçalves et al. (2011), denominado M1, que incorporou a densidade do solo ( $D_s$ ) nos seus coeficientes foi utilizado para o cálculo de valores estimados de  $\theta$  a partir dos valores de  $K_a$  medidos, conforme apresentado na Tabela 2. Este modelo foi desenvolvido a partir do trabalho de Trintinalha (2000).

Em função da importância do modelo construído por Topp et al. (1980), denominado M2, e de seu generalizado emprego em todo o mundo, este modelo também foi utilizado para se estimar a umidade do solo em função de  $K_a$ . Este modelo pode ser visualizado na Tabela 2. Este modelo foi proposto com a premissa de ser válido para qualquer condição, sendo desnecessária a calibração local, como se supunha inicialmente, para a técnica da TDR.

Devido a utilização do modelo de Ledieu et al. (1986), denominado M3, como modelo embutido no aparelho TDR100 (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2007), que utiliza uma regressão linear considerando a raiz quadrada de  $K_a$  ( $\theta = b_0 + b_1\sqrt{K_a}$ ), este modelo simples, apresenta seus coeficientes conforme Tabela 2.

Estudos posteriores mostraram que características locais poderiam influenciar, de maneira significativa, as medidas realizadas com a TDR. Para as condições brasileiras, Tommaselli & Bachi (2001) desenvolveram um trabalho com cinco solos de diferentes composições granulométricas, entre areia e argila, e geraram modelos de calibração específicos para cada um deles. Para o presente trabalho foi selecionado o modelo referente ao solo caracterizado como Latossolo Vermelho Escuro (LE), o qual continha  $386 \text{ gkg}^{-1}$  de argila;  $232 \text{ gkg}^{-1}$  de silte;  $382 \text{ gkg}^{-1}$  de areia e apresentou os seguintes valores médios para as seguintes propriedades:  $2,611 \text{ Mg m}^{-3}$  de densidade de partículas;  $84,6 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  de superfície específica;  $4,7 \text{ gkg}^{-1}$  de matéria orgânica e  $51,8 \text{ gkg}^{-1}$  de óxido de ferro. Este modelo, denominado M4, conforme apresentado na Tabela 2, foi selecionado por estar definido para o solo com maior conteúdo de argila dentre os selecionados pelos autores e, portanto, ser supostamente mais semelhante ao NITOSSOLO VERMELHO distroférico empregado no presente trabalho.

Kaiser et al. (2010) geraram, também, um modelo específico para cada solo estudado, sendo que um desses solos é um NITOSSOLO VERMELHO de Campos Novos-SC, apresentando  $705 \text{ gkg}^{-1}$  de argila,  $271 \text{ gkg}^{-1}$  de silte e  $24 \text{ gkg}^{-1}$  de areia. O modelo gerado para este solo, denominado M5, é representado conforme a Tabela 2.

Para avaliar de forma mais ampla a possibilidade de utilização de modelos ajustados em outras circunstâncias, para solos com composição granulométrica semelhante, foi empregado mais um modelo, o modelo de Santos et al. (2012), denominado M6, conforme Tabela 2. Este modelo foi ajustado para a estimativa de umidade em um solo que apresentou  $770 \text{ gkg}^{-1}$  de argila,  $90 \text{ gkg}^{-1}$  de silte e  $140 \text{ gkg}^{-1}$  de areia.

Devido à comparação de modelos ajustados a diferentes locais com o modelo de Ledieu et al. (1986) (ANISKO et al., 1994; DA SILVA et al., 1998; PUMPANEN & ILVESNIEMI, 2005; MINET et al., 2010), que é uma regressão linear em função da raiz quadrada de  $K_a$ , foi gerado um modelo linear de umidade em função da raiz quadrada de  $K_a$ , denominado M7, para o conjunto dos dados utilizados neste trabalho, conforme Tabela 2.

Foi gerado também um modelo polinomial conforme Tabela 2, denominado M8, para o conjunto dos dados. Diversos autores (SILVA & GERVÁSIO, 1999; TOMMASELLI & BACCHI, 2001; TRINTINALHA et al., 2001; VILLWOCK et al., 2004; SOUZA et al., 2007; MILANI et al., 2008; SANTOS et al., 2010; SANT'ANA et al., 2012) têm adotado a expressão polinomial, de grau até três, para a estimativa da umidade em função de  $K_a$ . Assim como o modelo anterior, este também foi utilizado no presente trabalho com o propósito de se avaliar comparativamente a qualidade das estimativas geradas.

Tabela 2 – Equações dos modelos empregados para descrever a relação entre umidade do solo e a sua correspondente constante dielétrica aparente.

Modelo	Equação	Referência
M1	$\theta = [0,842538 - 0,725175Ds]$ $+ [-0,049601 + 0,060353Ds]Ka$ $+ [0,001044 - 0,00106Ds]Ka^2$	Gonçalves et al. (2011)
M2	$\theta = (-530 + 292Ka - 5,5Ka^2 + 0,043Ka^3)10^{-4}$	Topp et al. (1980)
M3	$\theta = 0,1138\sqrt{Ka} - 0,1758$	Ledieu et al. (1986)
M4	$\theta = -0,0333 + 0,0393Ka - 0,0015Ka^2 + 2 \cdot 10^{-5}Ka^3$	Tommaselli & Bachi (2001)
M5	$\theta = 0,40283 - 0,04231Ka + 0,00194Ka^2 - 0,000022Ka^3$	Kaiser et al. (2010)
M6	$\theta = -0,5945 + 0,1243Ka - 0,0053Ka^2 + 8 \cdot 10^{-5}Ka^3$	Santos et al. (2012)
M7	$\theta = b_0 + b_1\sqrt{Ka}$	
M8	$\theta = b_0 + b_1Ka + b_2Ka^2$	

em que,  $\theta$  – umidade do solo base massa ( $m^3 m^{-3}$ );  $Ds$  – densidade do solo ( $Mg m^{-3}$ );  $Ka$  – constante dielétrica aparente do solo (adimensional)

Com o fim de melhorar a qualidade de ajuste desses dois últimos modelos, para as diferentes densidades do solo foram gerados, por meio de regressão linear, os modelos raiz quadrada e polinomial, empregando-se um nível de significância da ordem de 5% ( $p < 0,05$ ).

Os oito modelos descritos foram utilizados para a estimativa da umidade, a partir dos valores medidos de  $Ka$ . Os resultados obtidos permitiram a avaliação da qualidade dos modelos, bem como a comparação entre eles, para as condições locais. Inicialmente a comparação foi feita visualmente, a partir de gráficos que relacionam a umidade com o correspondente valor de  $Ka$ . Assim como feito por Silva & Gervásio (1999), utilizou-se a análise de variância para a comparação entre os modelos, assim como o teste de Tukey, como empregado por Teixeira et al. (2003). Para a aplicação do teste, foram comparados os valores de  $\theta$  observados e  $\theta$  estimados por cada modelo. Para realizar a análise de variância, adotou-se como recurso relacionar as séries de valores de umidade obtidos com cada um dos modelos, bem como a série de valores de umidade obtidos no experimento, a qual foi denominada série observada. As demais séries receberam o nome do respectivo modelo.

A qualidade do ajuste do modelo foi avaliada em primeiro lugar com base no modelo linear ajustado aos valores de umidade observados e estimados, para o qual se estabelece máxima qualidade (precisão absoluta) em coeficiente angular igual à unidade, ou seja, igual a um, e coeficiente linear igual a zero. O coeficiente de determinação obtido no ajuste do modelo também expressa a habilidade do modelo em descrever os valores obtidos, sendo

também utilizado como um indicador de qualidade. Quanto menor a dispersão em torno do modelo, mais próximo da unidade será o valor de  $R^2$ , o que expressa a maior precisão do modelo.

Para avaliar o desempenho dos modelos das equações foi aplicado o índice estatístico “c”, denominado índice de confiança ou índice de desempenho, que mostra o desempenho de um modelo ou de um método em relação a valores padrões, a partir das indicações de dois coeficientes, calculado conforme a equação 2 (CAMARGO & SENTELHAS, 1997):

$$c = rd \quad (2)$$

Sendo (r) o coeficiente de correlação, o qual indica a precisão do modelo, ou seja, indica o grau de correlação entre a variável dependente e as variáveis independentes, ou ainda, quanto a variável dependente é explicada pelas variáveis independentes. O índice d é o coeficiente de concordância (WILLMOTT, 1981), conforme equação 3, e indica o grau de exatidão entre os valores estimados e observados com variação entre zero (nenhuma concordância) e a unidade, que expressaria concordância perfeita entre os valores estimados e os observados.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (3)$$

em que,

$P_i$  - valor estimado;

$O_i$  - valor observado e

$O$  - média dos valores observados.

O índice d foi utilizado por Santana et al. (2007), Andrade Neto et al. (2012) para avaliar a capacidade dos modelos em estimar a concentração de potássio na solução do solo a partir de dados de umidade e condutividade elétrica aparente do solo. Sant’Ana et al. (2012) utilizou o índice d com o objetivo de avaliar o desempenho de sondas de TDR artesanais de diferentes comprimentos de haste. Santos et al. (2010) utilizou o índice d para avaliar modelos para estimativa do conteúdo volumétrico de água a partir da constante dielétrica do solo em diferentes solos e forma de amostragem; e avaliar a influencia da textura e forma de amostragem. Santos et al. (2012) utilizou para testar a performance dos modelos que

determinam a umidade do solo com base na constante dielétrica. Teixeira et al. (2003) empregou para comparar a performance da sonda de nêutrons e do TDR com o tensiômetro na obtenção da umidade do solo. Valero et al. (2009) avaliou o desempenho de uma curva de calibração ajustada, para cada um dos substratos avaliados, através da qual, por meio da técnica da TDR, estimou-se o seu conteúdo de água.

Os critérios empregados para a avaliação do desempenho dos métodos são mostrados na Tabela 3, a partir da apresentação dos mesmos feita por Camargo & Sentelhas (1997).

Tabela 3 – Critérios para análise de desempenho de um modelo por meio do índice c.

Desempenho	Ótimo	Muito bom	Bom	Mediano	Sofrível	Mau	Péssimo
Valor c	>0,85	0,85-0,76	0,75-0,66	0,65-0,61	0,60-0,51	0,50-0,41	<0,40

O índice de desempenho foi utilizado por vários autores em diversas áreas, para avaliar o desempenho de modelos. Costa et al. (2006) utilizou em modelos de ajuste para a determinação da curva de retenção de água no solo, Dornelas et al. (2006) utilizaram na comparação de estimativa dos coeficientes médios a e b da equação de Angström-PreScott, Antonini et al. (2009) utilizaram em um modelo matemático para a estimativa da temperatura média diária, Martins & Streck (2007) utilizaram para avaliar e comparar os modelos de estimativa do aparecimento de folhas em mudas de *Eucalyptus grandis* e *E. saligna*, Sousa et al. (2010), Syperreck et al. (2008), Araújo et al. (2010), Leitao et al. (2007) e Sobrinho et al. (2011) utilizaram para a comparação de diferentes métodos para estimativa de evapotranspiração de referência, Moreira et al. (2006) estimativa da erosividade da chuva, Cecílio & Santos (2009) estimativa da umidade do solo, Castro et al. (2010) diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. Tavares et al. (2008) comparou determinações da curva de retenção da água, utilizando câmara de pressão de Richards e dois equipamentos de TDR, em um solo com alto teor de argila.

Computaram-se os desvios médios relativos (equação 4) e desvios relativos (equação 5) entre a umidade estimada pelos modelos e a umidade observada para se avaliar em quanto a estimativa feita pelo modelo promove, em termos de um percentual da água disponível.

$$DMR = \frac{(a \cdot \theta_{Obs} + b) - \theta_{Obs}}{DTA} \cdot 100 \quad (4)$$

em que,

DMR – desvio médio relativo (%)

a – coeficiente angular com base no modelo linear ajustado aos valores de umidade observados e estimados pelos modelos

b – coeficiente linear com base no modelo linear ajustado aos valores de umidade observados e estimados pelos modelos

$\theta_{Obs}$  – umidade observada ( $m^3 m^{-3}$ )

DTA – disponibilidade total de água ( $m^3 m^{-3}$ )

$$DR = \frac{(\theta_{E/Mod} - \theta_{Obs})}{DTA} \cdot 100 \quad (5)$$

em que,

DR – desvio relativo (%)

$\theta_{E/Mod}$  – umidade estimada pelo modelo ( $m^3 m^{-3}$ )

$\theta_{Obs}$  – umidade observada ( $m^3 m^{-3}$ )

DTA – disponibilidade total de água ( $m^3 m^{-3}$ ).

Sempre que um fenômeno natural é investigado, a partir de um conjunto de medidas de uma variável pertinente, existirá um erro amostral associado ao processo. A partir da premissa de que o erro amostral não pode ser evitado, mas pode ser limitado através da escolha de uma amostra de tamanho adequado, existe uma necessidade, então, da definição de um tamanho adequado para a amostra. Essa necessidade não está associada apenas à diminuição do erro amostral, mas também ao fato de que uma amostra muito maior do que o necessário acarreta perda de tempo e investimento, por sua vez uma amostra muito menor do que o necessário pode não ser o suficiente para responder os questionamentos da pesquisa.

Segundo Bolfarine & Bussab (2005) o erro padrão do estimador, diminui à medida que aumenta o tamanho da amostra, desta forma um ponto-chave de um levantamento amostral é a determinação do tamanho da amostra. Então se faz necessário um método para determinar o tamanho mínimo da amostra garantindo a qualidade de estimativa.

Para determinação de um número mínimo de leituras que devem ser realizadas na construção de um modelo de estimativa de umidade de solo, foi efetuada uma estimativa do tamanho necessário da amostra, ou seja, do número de medidas a serem realizadas, para se obter um determinado grau de confiança, em função do desvio padrão associado às medidas realizadas. Os valores foram obtidos, conforme Daniel (2009), com o emprego da equação 6.

$$n = \left( \frac{Z_{(1-\alpha)/2}}{\epsilon} \cdot s \right)^2 \quad (6)$$

em que,

n – número de leituras;

$Z_{(1-\alpha)/2}$  – valor crítico que corresponde ao grau de confiança desejado;

s – desvio-padrão amostral (utilizado quando quantidade de amostras for maior do que 30 e não se souber o desvio-padrão populacional);

E – margem de erro ou erro máximo de estimativa.

Para a análise estatística, utilizou-se o software SISVAR (FERREIRA, 2011) em que foi realizada a análise de variância e foram determinados os coeficientes dos modelos raiz e polinomial, para os dados em conjunto e para cada série de dados, correspondentes aos diferentes valores de Ds empregados. Utilizou-se o software STATISTICA 8.0 (STATSOFT, 2007) para a elaboração dos gráficos boxplot.

De acordo com Statsoft (2007), o gráfico de boxplot é construído da seguinte forma, calcula-se a mediana, o quartil inferior (Q1) e o quartil superior (Q3); subtrai-se o quartil superior do quartil inferior = (L); os valores que estiverem no intervalo de  $Q3+1,5L$  e  $Q3+3L$  e no intervalo  $Q1-1,5L$  e  $Q1-3L$ , serão considerados outliers; os valores que forem maiores que  $Q3+3L$  e menores que  $Q1-3L$ , estes valores são chamados de extremos.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 DADOS GERAIS

Os modelos M7 e M8 tiveram os seus coeficientes determinados estatisticamente via regressão linear para os dados gerais. Os coeficientes da regressão, de determinação e a significância, p-valor, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes obtidos por meio de regressão linear, coeficiente de determinação e significância para os modelos raiz e polinomial ajustados aos dados obtidos.

Modelos					
M7			M8		
	Coeficientes	p-valor		Coeficientes	p-valor
$b_0$	-0,14316901198	<0,001	$b_0$	0,04056750056	<0,001
$b_1$	0,10451575293	<0,001	$b_1$	0,01628219999	<0,001
			$b_2$	-0,00010958026	<0,001
$R^2$	0,964		$R^2$	0,964	

O resumo estatístico para os 624 valores de umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) e de constante dielétrica (Ka), obtidos nos 14 recipientes utilizados no presente trabalho é apresentado na Tabela 5. Apresenta-se também, nesta Tabela, o resumo estatístico para os 14 valores de densidade do solo (Ds), obtidos nos recipientes. Pode-se observar que  $\theta$  variou de valores maiores que aquele referente à capacidade de campo para este solo ( $\theta_{cc} = 0,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) até valores menores que aquele referente ao ponto de murcha ( $\theta_{pm} = 0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ).

Tabela 5 – Resumo estatístico dos valores medidos da umidade do solo,  $\theta$  ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) da constante dielétrica, Ka, e da densidade do solo, Ds ( $\text{Mgm}^{-3}$ ).

Estatística	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
$\theta$	0,14	0,55	0,37	0,10	27,11
Ka	7,70	41,46	24,61	8,98	36,49
Ds	0,95	1,38	1,13	0,15	13,06

Os valores apresentados na Tabela 5 permitem verificar que o coeficiente de variação de Ka é superior ao determinado para a umidade do solo, evidenciando uma maior variação destes valores. A variação da densidade do solo provavelmente contribuiu para esta maior

amplitude de valores de  $K_a$ , o que expressaria o efeito de  $D_s$  sobre o modelo de calibração, conforme evidenciado estatisticamente no modelo estabelecido por Gonçalves et al. (2011). Destaca-se que os valores de densidade estabelecidos neste trabalho são compatíveis com os valores comumente encontrados no campo, em áreas agrícolas da região, com este solo.

Com o propósito de permitir a comparação visual entre os modelos empregados, apresentam-se na Figura 2 as curvas obtidas para cada um deles, em um gráfico que relaciona a umidade do solo com o correspondente valor de  $K_a$ . Visto que o modelo M1 depende da  $D_s$  e não somente de  $K_a$ , para representar este modelo, a  $D_s$  adotada foi de  $1,15 \text{ Mgm}^{-3}$ , correspondente ao valor médio obtido no presente trabalho.

Dentre os modelos, destaca-se M6, por apresentar forte inclinação da curva para valores de  $K_a$  acima de 30, diferindo-o fortemente dos demais modelos. Este crescimento acentuado está relacionado com o termo de terceiro grau do modelo, o qual foi significativo no estudo destes autores. Os modelos de M4 e M5 destacam-se do conjunto, apresentando curvaturas opostas na faixa de valores de  $K_a$  entre 10 e 30. Os demais modelos apresentam curvas semelhantes entre si, com diferenças proporcionalmente menores entre eles.

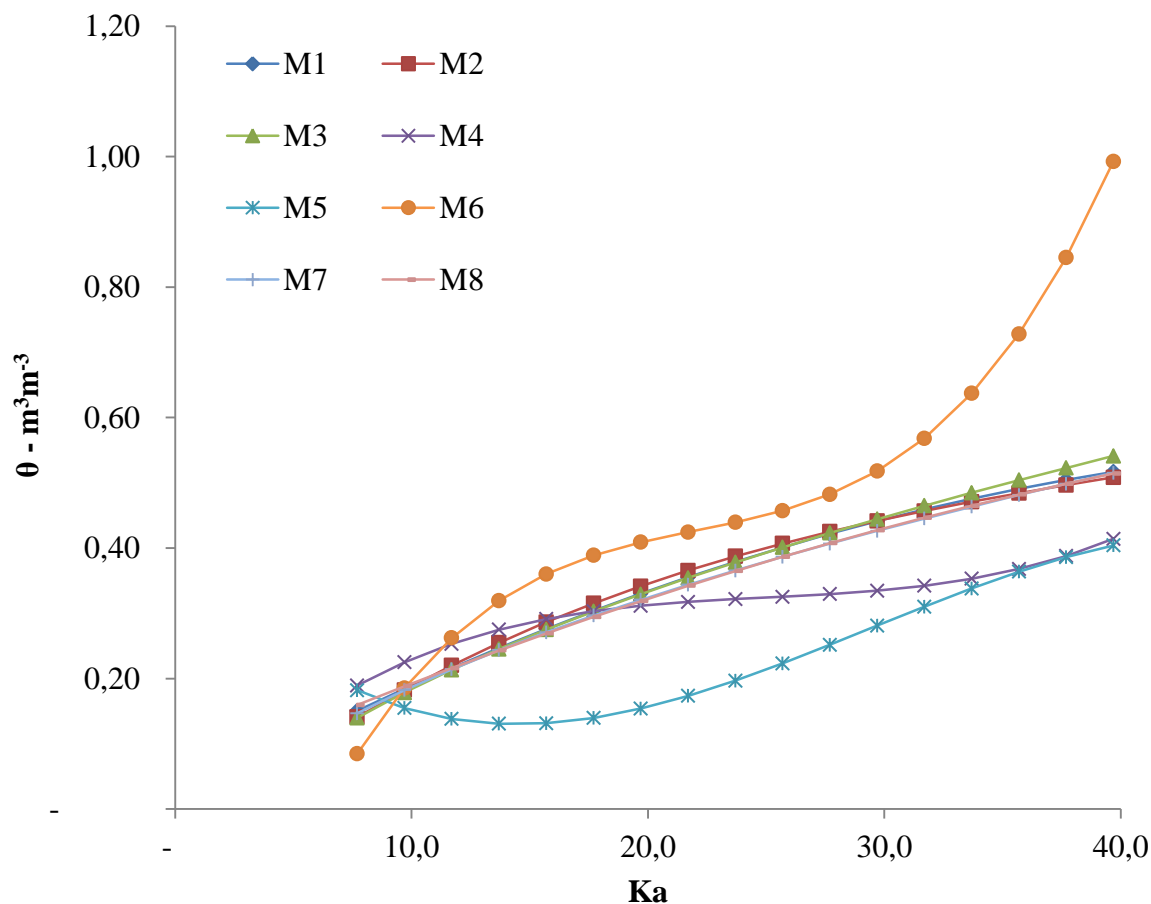


Figura 2 – Relação entre umidade do solo e correspondente valor de  $K_a$ , para os modelos utilizados.

A avaliação comparativa da qualidade de cada modelo para descrever os valores observados de umidade foi feita por meio da análise de variância, conforme Tabela 6. Para tanto, nove séries de dados foram comparadas entre si, sendo uma correspondente ao conjunto de valores observados e as demais correspondentes aos valores gerados pelos oito modelos selecionados.

Tabela 6 – Análise de variância para as séries de valores de umidade do solo.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Séries	8	23,709733	2,963717	243,234	0,0001
Erro	5607	68,319097	0,012185		
Total corrigido	5615	92,028829			
CV(%) =	30,27				

Pode-se observar na Tabela 6 que houve diferença significativa ( $p < 0,0001$ ) entre as séries de valores. Resultado semelhante foi obtido por Silva & Gervásio (1999), os quais também compararam os valores gerados por modelo com o conjunto de valores medidos, por meio de ANOVA. Com o propósito de avaliar comparativamente os modelos, optou-se pela utilização do teste de Tukey para a comparação entre as séries de valores. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores médios de umidade nas séries comparadas e resultado da aplicação do teste de Tukey.

Séries	Média	Tukey
Observado	0,366	c
M5	0,232	a
M4	0,322	b
M7	0,366	c
M8	0,366	c
M1	0,373	c
M2	0,378	c
M3	0,378	c
M6	0,500	d

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Como pode ser visualizado na Tabela 7, a comparação entre as séries por meio do

teste de média revela que apenas três modelos diferem estatisticamente entre si e do restante. Nestas circunstâncias, o modelo M5 apresenta a menor média, seguida pelo modelo M4 e com a maior média está o modelo M6. As séries referentes aos modelos M7, M8, M1, M2 e M3 não diferem estatisticamente entre si nem diferem da série de dados observados, mas diferem dos outros modelos. Coelho et al. (2001) encontrou resultados diferentes dos obtidos no presente trabalho. Para estes autores, os valores obtidos para M2 diferiram estatisticamente, em termos médios, dos valores observados.

Os gráficos obtidos pela comparação entre os valores de  $\theta$  observados e aqueles estimados pelos oito modelos empregados são apresentados na Figura 3. A observação dos oito gráficos revela que a dispersão dos valores em torno do modelo linear ajustado é maior para os modelos M6, M5 e M4, nesta sequência, de forma decrescente. Para os modelos restantes, a dispersão é menor. Pode-se observar na Tabela 8 que os valores do coeficiente de determinação obtidos para os modelos M5 e M6 são semelhantes, 0,85 e 0,83 respectivamente e, para o modelo M4 é de 0,91. Para os demais modelos os valores são semelhantes, variando entre 0,95 e 0,97.

Santos et al. (2010) obtiveram o valor de 0,71 para o coeficiente de determinação referente ao ajuste do modelo M1 e o valor de 0,97 para o M7.

Pode-se observar na Figura 3 que os modelos M1, M2, M3, M7 e M8 apresentam a reta ajustada praticamente sobre a reta 1:1. Isto revelando que, em média, estes modelos são não tendenciosos. De fato, pode-se observar na Tabela 8 que os coeficientes angulares destes modelos são próximos da unidade, e o coeficiente linear é próximo de zero. Destaca-se o modelo M1, no qual a incorporação da  $D_s$  promoveu o melhor desempenho, em termos médios.

Os resultados obtidos para os modelos M4, M5 e M6, explicitam o risco de se tomar um modelo empírico ajustado adequadamente a um conjunto de dados, para ser utilizado em outro solo. Estes modelos foram desenvolvidos para solos de textura argilosa. Não obstante, eles se revelaram inadequados para a utilização nas condições do presente estudo.

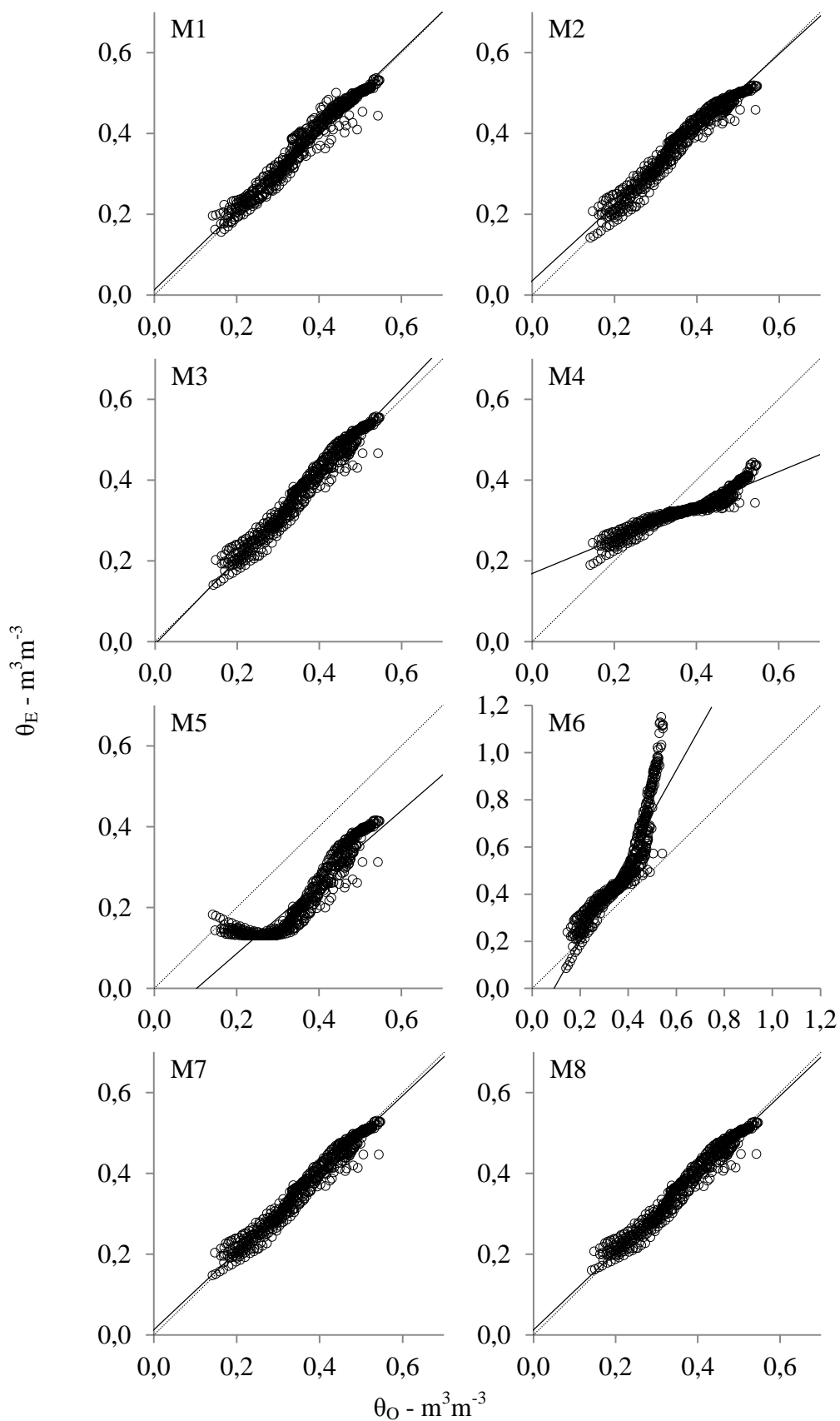


Figura 3 – Valores de  $\theta$  observados ( $\theta_O$ ) e estimados ( $\theta_E$ ) pelos modelos e modelo linear ajustado aos pares de valores para os modelos.

A Figura 3 (e) e os valores na Tabela 8 revelam que o modelo M5 proporciona um erro sistemático de estimativa, indicado pelo afastamento do modelo linear ajustado à reta 1:1 e o  $R^2$  de 0,85 revela ainda uma maior dispersão dos valores, o que compromete a precisão da estimativa realizada.

O modelo M4 apresenta o coeficiente angular da reta de 0,419 (Tabela 8), o que revela forte inclinação em relação à reta 1:1, evidenciando que o modelo superestima os valores de  $\theta$  em uma região e subestima em outra, tornando-o inadequado como o M5.

O modelo M6 promoveu a maior dispersão e inclinação, respectivamente, com  $R^2$  de 0,826 e coeficiente angular de 1,816 (Tabela 8). A Figura 3 (f) mostra os grandes desvios promovidos por este modelo, para os valores mais elevados de umidade.

A Tabela 8 apresenta os valores dos coeficientes angular e linear do modelo linear ajustado aos valores apresentados na Figura 3, bem como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido via regressão linear.

Tabela 8 – Coeficiente angular (a), linear (b) e de determinação ( $R^2$ ) para os oito modelos.

Coeficiente	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
a	0,984	0,936	1,051	0,419	0,884	1,816	0,965	0,964
b	0,013	0,035	-0,006	0,169	-0,091	-0,165	0,013	0,013
$R^2$	0,963	0,957	0,965	0,907	0,850	0,826	0,965	0,964

Na tabela 9 são apresentados os valores calculados, para os oito modelos, dos índices d de Willmott (1981), que expressa uma medida de exatidão do modelo, o coeficiente de correlação, que expressa uma medida da precisão do modelo e o índice c, que expressa um desempenho conjunto do modelo, também considerado um indicador de confiança.

Verifica-se que os modelos, em ordem, M7, M8, M1, M2 e M3 foram os melhores modelos por estarem com valores mais perto da unidade. Isto sugere que, em termos médios, a incorporação da Ds (M1) promoveu ganho de qualidade pouco significativo em termos médios e que os modelos empíricos M2 e M3 tem, em média, a mesma qualidade dos modelos ajustados aos dados no presente trabalho.

Os valores do Índice d para os modelos M2, M3 e M7 ficam próximo dos valores encontrados por Santos et al. (2010), 0,95, 0,98, 0,99 respectivamente, para um LATOSSOLO VERMELHO.

Tabela 9 – Índice de Willmott (d), de correlação (r) e de desempenho (c) para os oito modelos.

Índice	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
d	0,989	0,985	0,986	0,773	0,675	0,700	0,991	0,991
r	0,981	0,978	0,982	0,952	0,922	0,909	0,982	0,982
c	0,971	0,964	0,969	0,737	0,622	0,636	0,974	0,973

De acordo com a Tabela 3, os modelos M1, M2, M3, M7 e M8 podem ser caracterizados como Ótimos, enquanto M4 seria classificado como Bom e M5 e M6 como Medianos. Cecílio & Santos (2009) construíram um modelo para um Latossolo Vermelho-Amarelo para o qual encontraram um índice d de 0,993, correlação de 0,986 e desempenho de 0,979, índices com valores superiores aos encontrados para todos modelos no presente trabalho. Isto se deve, provavelmente, à grande amplitude de valores de densidade do solo aqui estabelecida, tornando a relação entre umidade e  $K_a$  uma nuvem de pontos ampla demais para ser descrita com este nível de qualidade por um único modelo. Neste sentido, a opção empregada por Gonçalves et al. (2011) de incorporar a  $D_s$  no modelo é corroborada.

Embora os critérios usualmente empregados para a caracterização da qualidade do ajuste de um modelo a um conjunto de dados experimentais sinalizem, no presente trabalho, para que os modelos em questão tenham qualidade de moderada a ótima, uma análise minuciosa revela que, para o fenômeno em estudo, cuidados adicionais devam ser tomados. Para tanto, mostra-se, na Figura 4, os desvios médios relativos obtidos com o emprego dos oito modelos. Verifica-se que os modelos “importados”, M4, M5 e M6, em especial, apresentam desvio médios relativos à AD que superam 100% desta faixa de água disponível, os que evidenciam os grandes erros associados ao emprego de algum deles para a estimativa da umidade neste solo.

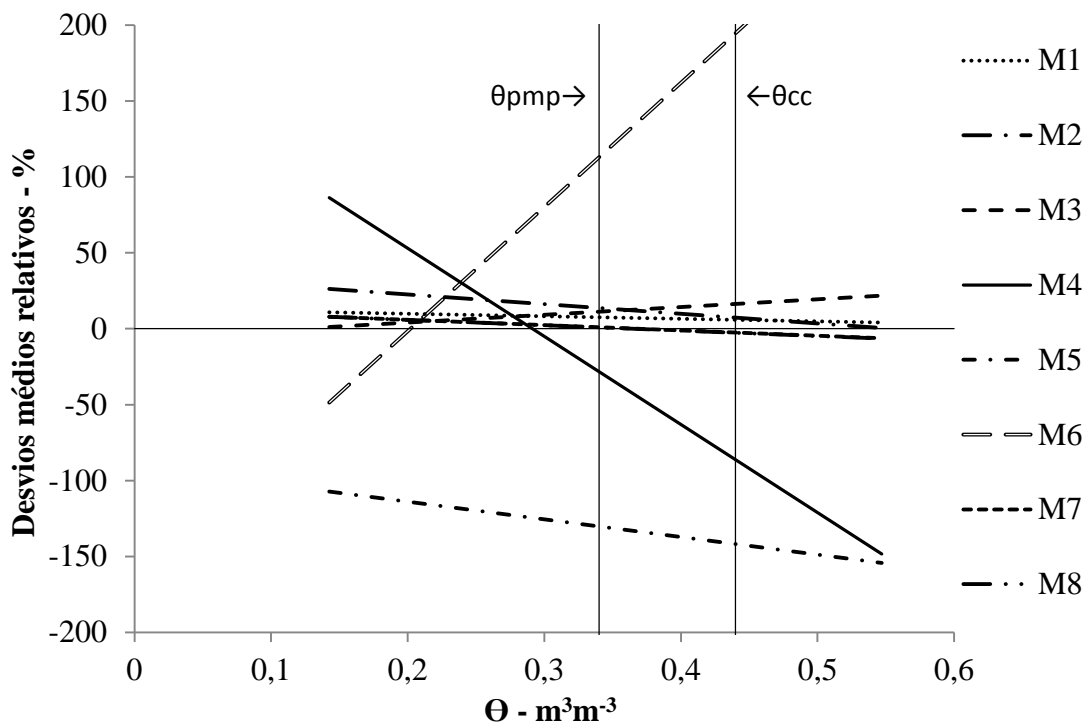


Figura 4 – Valores dos desvios médios relativos dos modelos lineares ajustados, para os oito modelos adotados.

De acordo com o apresentado na Figura 4, o modelo M5 subestima a umidade, sendo que seu desvio médio relativo ultrapassa os 100%. Nos valores entre a capacidade de campo para este solo ( $\theta_{cc} = 0,44 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ) e ponto de murcha ( $\theta_{pm} = 0,34 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ), o modelo M6 superestima a umidade entre valores de 100% a 200% e o modelo M4 subestima entre valores de 25% a 100%. Os modelos de M1, M2 e M3 mesmo sendo classificados como Ótimos pelo índice c, apresentaram desvios médios relativos que evidenciam a superestimativa da umidade. Estes resultados coincidem com resultados encontrados por Coelho et al. (2001), Tommaselli e Bacchi (2001), Villwock et al. (2004), Kaiser et al. (2010), Santos et al. (2010), segundo os quais o modelo de M2 superestima os valores de umidade e divergem dos resultados de Silva & Gervásio (1999), Andrade et al. (2003), Teixeira et al. (2003), Lacerda et al. (2005) segundo os quais o modelo M2 subestima os valores de umidade.

De acordo com o apresentado na Figura 4, os modelos M7 e M8 assim como M1 e M2, apresentam, em termos de desvios médios, qualidade adequada, particularmente dentro da faixa de água disponível no solo, mas também fora dela, em ampla extensão.

A Tabela 10 apresenta o resumo estatístico dos valores dos desvios médios relativos obtidos a partir dos oito modelos avaliados.



Tabela 10 – Resumo estatístico dos desvios médios relativos (%) obtidos com o emprego dos oito modelos.

<b>Estatística</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>
Média	7,18	12,00	12,60	-43,47	-133,18	133,91	-0,02	-0,02
Desvio padrão	1,61	6,34	5,04	57,63	11,50	80,96	3,47	3,55
Intervalo	6,56	25,84	20,52	234,78	46,84	329,84	14,15	14,47
Mínimo	4,25	0,44	1,25	-148,44	-154,12	-48,46	-6,34	-6,48
Máximo	10,81	26,29	21,77	86,34	-107,29	281,38	7,81	7,98
CV (%)	22,44	52,88	39,98	-132,56	-8,63	60,46	-22.480,78	-22.960,38

Pode-se observar na Tabela 10 que os modelos “importados” apresentam desvios médios que expressam sub e superestimativas superiores a 100% da AD. Por outro lado, o M1 apresenta média do desvio relativo médio percentual de apenas 7%, e M3 de 12%. Destacam-se os modelos M7 e M8, com média de - 0,02%, o que promove a perda de significado do valor do coeficiente de variação para estes modelos, cujos valores superam 20.000%. Este fato demonstra, em uma constatação à parte, que a observação de um único critério para a caracterização de um parâmetro estatístico, pode levar a erros severos de interpretação, como discutido por Libardi et al. (1996). A análise dos valores apresentados na Tabela 10 revela também que o modelo M1 apresenta o menor desvio padrão e o menor intervalo de valores. Isso demonstra que este modelo, ao incorporar a Ds na estimativa, apresenta uma melhor qualidade no ajuste, em termos de desvios médios. Importante destacar que as avaliações de qualidade de ajuste baseadas na análise visual, na análise de variância com teste de média, na análise do ajuste do modelo via regressão, e mesmo com a abordagem mais elaborada utilizando-se a estratégia apresentada por Willmott (1981), e empregada em inúmeros trabalhos, não permitiram chegar a esta constatação.

A avaliação da habilidade de cada modelo em descrever o fenômeno em estudo pode ser ainda mais elaborada levando-se em conta a distribuição dos desvios relativos absolutos (equação 5) em toda a faixa de valores estudada. Na Figura 5 é mostrada a distribuição dos valores destes desvios, para os modelos empregados.

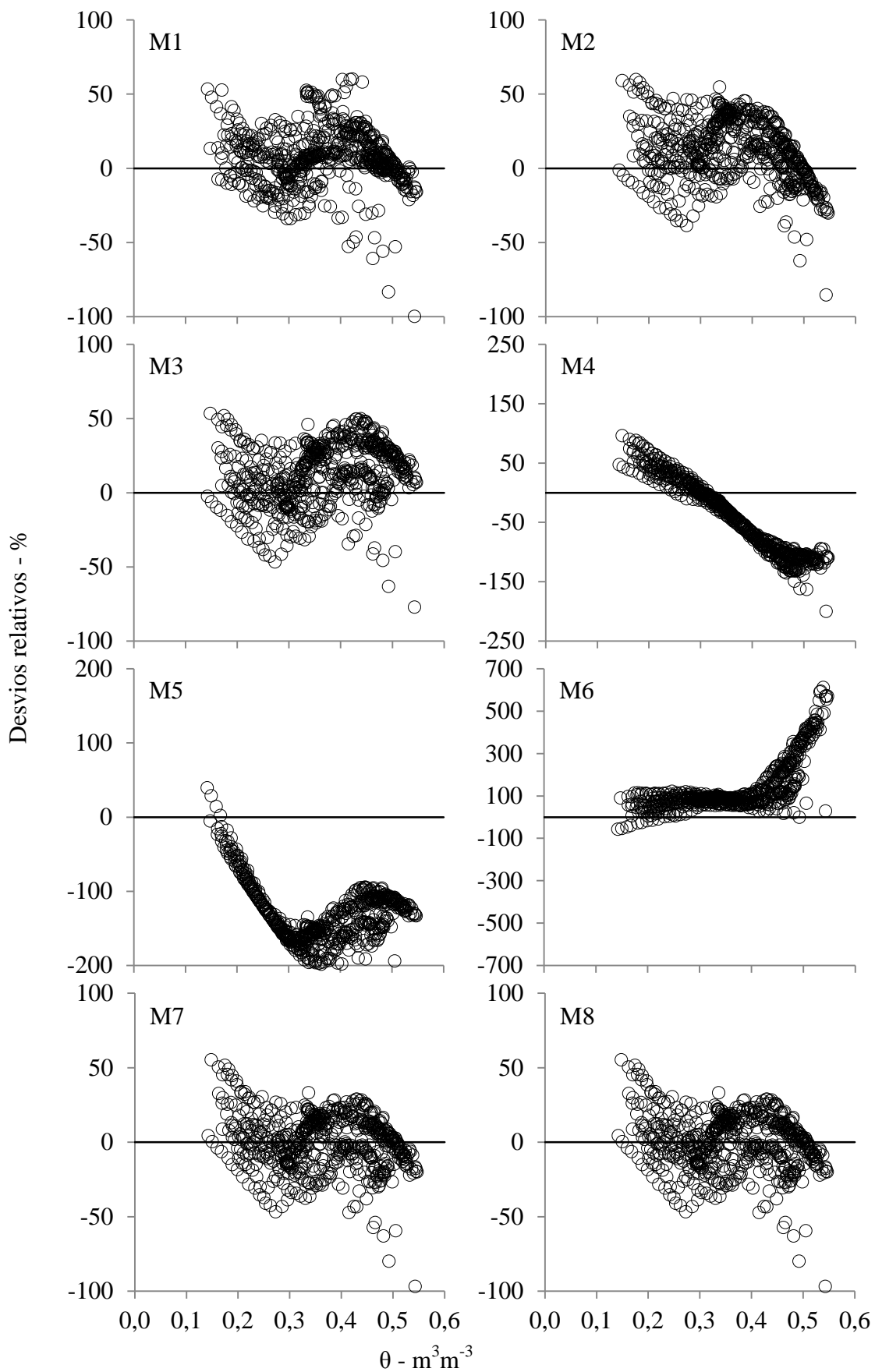


Figura 5 – Valores dos desvios relativos dos modelos.



O resumo estatístico dos valores dos desvios relativos para cada modelo é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Resumo estatístico dos valores dos desvios relativos (%) obtidos para os oito modelos.

<b>Estatística</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>
Média	7,18	12,00	12,60	-43,47	-133,18	133,91	-0,02	-0,02
Desvio padrão	19,32	20,64	20,47	59,15	38,62	115,77	18,55	18,76
Intervalo	159,94	145,15	130,57	296,26	271,69	668,73	152,13	153,75
Mínimo	-99,90	-85,44	-77,16	-200,36	-232,22	-57,65	-96,88	-95,56
Máximo	60,04	59,72	53,41	95,90	39,47	611,07	55,25	58,19
CV	269,02	172,03	162,53	-136,06	-28,99	86,45	-120.066,16	-121.310,12

A imediata e contundente constatação decorrente da observação da Tabela 11 é a de que, independente do modelo empregado, a amplitude dos desvios é da ordem de 130% a até quase 700% da água disponível no solo. Assim, toda a qualidade sinalizada para alguns modelos, dentre os selecionados para o presente trabalho, perde drasticamente sustentação, com a evidencia de que qualquer um deles pode proporcionar, em qualquer momento, uma estimativa da umidade do solo que implica em um erro superior a 100% da AD, subestimando ou superestimando o valor real. Isto mostra que a medida da umidade do solo com a técnica da TDR sempre esteve e estará cercada de elevado grau de incerteza, o que deve ser levado em conta nos trabalhos com ela realizados. Deve-se considerar, no entanto, que a imposição de ampla faixa de valores de densidade do solo implicou, no presente trabalho, em uma situação mais ampla de valores, tornando-a menos favorável a um ajuste adequado de um único modelo. Possivelmente, em condições de campo, um universo mais homogêneo em termos de densidade do solo, pode levar a um cenário de menor amplitude de erros que o aqui verificado. Para avaliar esta possibilidade, conduziu-se o estudo da qualidade dos ajustes para cada valor de densidade empregado no presente trabalho.

A comparação entre modelos a partir dos valores apresentados na Tabela 11 revela que o modelo M3 apresenta a menor amplitude de desvios. Considerando que este é um modelo ajustado para outro conjunto de dados, é interessante constatar este fato, em relação aos modelos M7 e M8, ajustados para o conjunto de dados deste trabalho e, em especial, em relação ao modelo M1, também ajustado aos dados locais, com a incorporação da densidade nos seus coeficientes. Estas constatações permitem corroborar a afirmativa de que a calibração local para a TDR é essencial mas, por outro lado, impõem o fato inegável de que, mesmo com a calibração local, os erros associados às estimativas realizadas podem ser

grandes demais, para algumas aplicações práticas.

#### 4.2 AVALIAÇÃO EM CADA VALOR DE DENSIDADE

A avaliação da qualidade de cada um dos modelos selecionados, para a descrição da relação entre umidade do solo e o correspondente valor de  $K_a$  foi feita para cada série de valores medidos, correspondentes a cada valor de densidade do solo previamente fixado. Destaca-se que o trabalho foi conduzido de forma a gerar número diferente de leituras para os diferentes valores de  $D_s$ , uma vez que estes foram avaliados em diferentes momentos. O número mínimo de pontos em cada curva, no entanto, não foi inferior a 25, como forma de se assegurar a confiabilidade dos resultados.

O resumo estatístico para os 624 valores de constante dielétrica ( $K_a$ ) e de umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ), obtidos para cada um dos 14 valores de  $D_s$  estabelecidos no experimento, é apresentado na Tabela 12.

Pode-se observar que  $\theta$  variou entre valores maiores que aquele referente à capacidade de campo para este solo ( $\theta_{cc} = 0,44 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ) até valores menores que aquele referente ao ponto de murcha ( $\theta_{pm} = 0,34 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ). Para os valores de  $D_s$  de 0,98 e 1,38, no entanto, o valor máximo foi próximo à capacidade de campo. Isto decorreu do fato de que, nestes caso, o processo de secagem a partir da saturação ocorreu por um período de algumas horas a mais, antes da primeira leitura.

Tabela 12 – Resumo estatístico dos valores medidos da umidade do solo,  $\theta$ , ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ) e da constante dielétrica,  $K_a$ , para cada densidade do solo,  $D_s$ , ( $\text{Mgm}^{-3}$ ).

$D_s$		Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
0,95	$\Theta$	0,32	0,54	0,43	0,07	15,81
	$K_a$	20,42	41,46	31,68	6,59	20,80
0,98	$\Theta$	0,17	0,42	0,28	0,07	26,32
	$K_a$	9,50	25,20	16,09	5,05	31,38
0,99	$\Theta$	0,33	0,55	0,44	0,07	15,79
	$K_a$	21,32	41,12	32,43	6,52	20,10
1,01	$\Theta$	0,14	0,54	0,29	0,11	39,13
	$K_a$	7,70	31,80	15,17	7,32	48,22
1,04	$\Theta$	0,18	0,47	0,30	0,08	27,57
	$K_a$	10,20	31,60	19,23	6,58	34,24
1,05	$\Theta$	0,29	0,53	0,41	0,08	18,42
	$K_a$	16,31	39,54	29,93	8,06	26,94
1,09	$\Theta$	0,20	0,51	0,32	0,10	29,42
	$K_a$	10,20	31,80	18,92	7,39	39,04
1,18	$\Theta$	0,20	0,48	0,30	0,08	25,86
	$K_a$	11,20	34,40	19,24	6,74	35,03
1,23	$\Theta$	0,28	0,48	0,38	0,07	18,02
	$K_a$	15,92	33,53	24,50	6,39	26,08
1,25	$\Theta$	0,17	0,48	0,29	0,09	30,97
	$K_a$	10,50	33,30	17,59	7,39	42,02
1,27	$\Theta$	0,19	0,48	0,32	0,08	25,18
	$K_a$	10,80	34,50	19,07	7,22	37,85
1,31	$\Theta$	0,33	0,50	0,41	0,06	14,15
	$K_a$	22,73	36,39	27,68	4,25	15,37
1,35	$\Theta$	0,16	0,47	0,28	0,09	31,53
	$K_a$	10,50	32,70	17,25	6,63	38,44
1,38	$\Theta$	0,15	0,44	0,27	0,08	27,44
	$K_a$	11,00	33,80	17,70	5,20	29,37

Os valores apresentados na Tabela 12 permitem verificar que os coeficientes de variação de  $K_a$  são superiores aos determinados para a umidade do solo, evidenciando uma maior variação destes valores. A variação da densidade do solo e de cada sonda, provavelmente contribuiu para esta maior amplitude de valores de  $K_a$ , o que expressaria o efeito de  $D_s$  sobre o modelo de calibração, conforme evidenciado estatisticamente no modelo estabelecido por Gonçalves et al. (2011). A variação de sonda decorre da variação em que há em cada uma delas, até o momento não foi possível tornar essa variação inexistente. Desta forma, ficou clara a conveniência de se avaliar a qualidade do ajuste de cada modelo, dentro de cada valor de  $D_s$ .

Para se comparar entre modelos em cada valor de  $D_s$ , foram tomados os modelos M2 a M6 com os coeficientes já apresentados, uma vez que estes modelos gerais não se modificam em função do valor da  $D_s$ . O modelo M1 leva em conta o valor de  $D_s$ , para cada estimativa. Os modelos M7 e M8 tiveram os seus coeficientes determinados estatisticamente via regressão no software SIVAR (FERREIRA, 2011) para cada valor de  $D_s$ . Esta regressão deu origem também a um coeficiente de determinação, o qual é, junto com os coeficientes, apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Coeficientes obtidos por meio de regressão linear e coeficiente de determinação para os modelos raiz e polinomial ajustados aos dados obtidos para cada valor de densidade do solo.

Ds	Modelo Raiz			Modelo Polinomial			
	$b_0$	$b_1$	$R^2$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$R^2$
0,95	- 0,20059	0,11328	0,989	0,17576	0,00546	0,00008	0,996
0,98	- 0,17995	0,11613	0,974	0,04842	0,01442	n.s.	0,979
0,99	- 0,22716	0,11849	0,986	0,21722	0,00251	0,00013	0,995
1,01	- 0,18651	0,12414	0,983	0,05694	0,01502	n.s.	0,976
1,04	- 0,16500	0,10741	0,962	0,17351	n.s.	0,00031	0,990
1,05	- 0,11200	0,09726	0,967	0,28137	- 0,00227	0,00021	0,991
1,09	- 0,14090	0,10901	0,953	0,19308	n.s.	0,00032	0,975
1,18	- 0,15609	0,10610	0,990	0,02920	0,01678	- 0,00012	0,989
1,23	- 0,12676	0,10356	0,984	0,05939	0,01607	- 0,00011	0,983
1,25	- 0,15361	0,10739	0,970	- 0,05151	0,02623	- 0,00034	0,973
1,27	- 0,11533	0,10178	0,970	- 0,03917	0,02645	- 0,00035	0,981
1,31	- 0,34715	0,14404	0,973	- 0,50899	0,05222	- 0,00067	0,990
1,35	- 0,20011	0,11741	0,971	- 0,12438	0,03250	- 0,00046	0,987
1,38	- 0,24936	0,12549	0,957	- 0,19354	0,03701	- 0,00055	0,988

Como se observa na Tabela 13 os valores do coeficiente de determinação para todas as  $D_s$ , nos dois modelos, raiz e polinomial, apresentam valores superiores a 0,950, o que expressa a alta habilidade dos modelos ajustados em descrever os valores obtidos.

Na Figura 7 são apresentados os gráficos obtidos pela comparação entre os valores de  $\theta$  obtidos experimentalmente e aqueles estimados pelo modelo M1 para cada  $D_s$ .

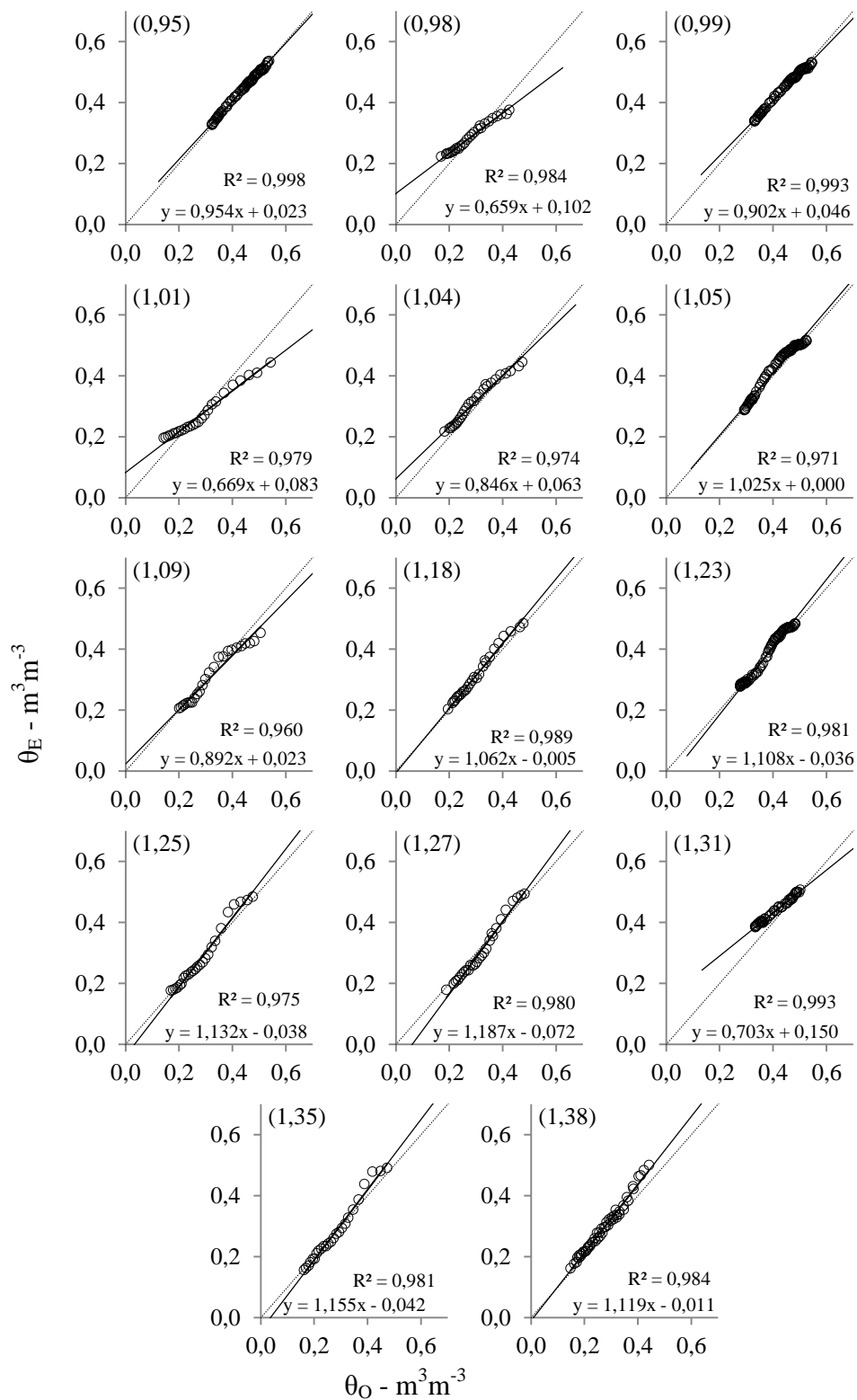


Figura 7 – Valores de  $\theta$  observados ( $\theta_O$ ) e estimados ( $\theta_E$ ) pelo modelo M1, modelo linear ajustado ( $y=a.x+b$ ) aos pares de valores, coeficiente angular (a), coeficiente linear (b) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para cada densidade do solo.



Pode-se observar na Figura 7 que para alguns valores de  $D_s$ , a incorporação desta nos coeficientes do modelo geral não foi suficiente para uma adequada estimativa dos valores medidos. Destacam-se os valores de 0,98; 1,01 e 1,31 de  $D_s$ , nos quais o desvio em relação à reta 1:1 é marcante. A inclinação da reta ajustada ao conjunto de dados revela que o modelo superestima os valores de umidade em uma região e subestima em outra.

Destaca-se na Figura 7 que o coeficiente de determinação das retas ajustadas aos pares de pontos observados e estimados apresentou valores superiores a 0,96, revelando a supostamente grande habilidade (precisão) do modelo em explicar a relação entre os valores de umidade e  $K_a$ . Para o valor de  $D_s$  de 0,95, este coeficiente atingiu o valor 0,998, revelando a qualidade do ajuste do modelo. Para os valores de  $D_s$  de 0,98; 1,01 e de 1,31, pode-se verificar que o coeficiente angular da reta ajustada assume valores entre 0,65 e 0,70 revelando a existência de um erro sistemático, o que impõe estimativas equivocadas de umidade, comprometendo a sua exatidão. Isto ocorre a despeito de uma expressão de qualidade da precisão do processo de estimativa, uma vez que o coeficiente de determinação, nestes casos, ficou acima de 0,98. Estes fatos revelam, novamente, a importância de não se tomar uma única medida para a avaliação da qualidade do ajuste de um modelo para a descrição de um processo natural.

Na Figura 8 são apresentados os gráficos obtidos pela comparação entre os valores de  $\theta$  obtidos experimentalmente e aqueles estimados pelo modelo M2 para cada  $D_s$ .

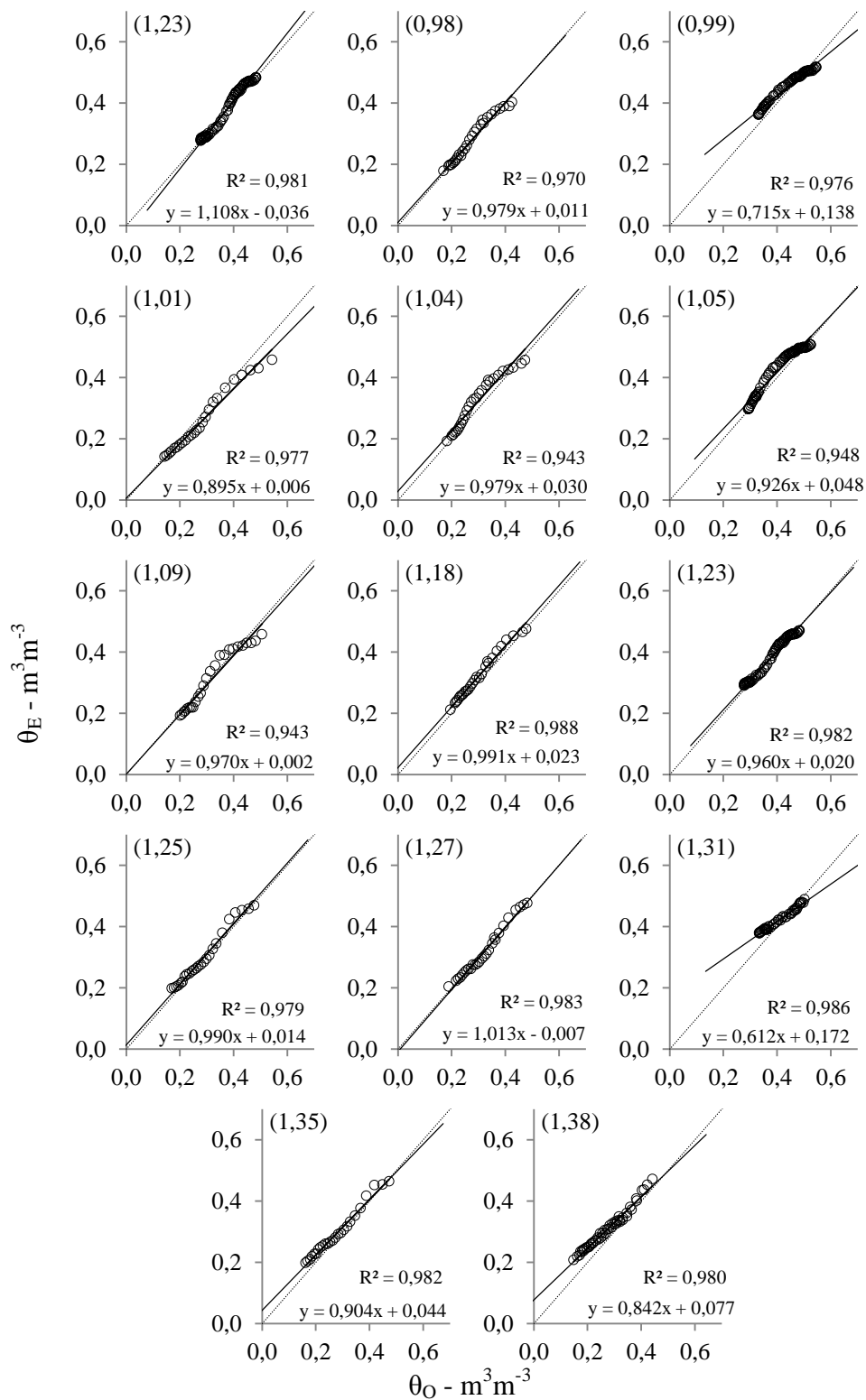


Figura 8 – Valores de  $\theta$  observados ( $\theta_O$ ) e estimados ( $\theta_E$ ) pelo modelo M2, modelo linear ajustado ( $y=a.x+b$ ) aos pares de valores, coeficiente angular (a), coeficiente linear (b) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para cada densidade do solo.

Para este modelo o coeficiente de determinação esteve sempre acima de 0,94, evidenciando, em linhas gerais, uma qualidade supostamente adequada para o ajuste do modelo, semelhante ao que ocorreu para o M1. Destaca-se que também para este modelo, em alguns valores de  $D_s$ , o coeficiente angular da reta desvia-se expressivamente da unidade, evidenciando o viés do modelo, o que compromete a sua exatidão dentro da faixa de valores estudados. Para os valores de  $D_s$  entre 1,18 e 1,27  $\text{Mgm}^{-3}$  foram obtidos os maiores valores de coeficiente de determinação e os valores de coeficiente angular mais próximos da unidade, revelando que, nestas condições, o modelo explica o processo em estudo de forma supostamente adequada, de maneira semelhante ao que ocorreu com o modelo M1, em linhas gerais.

Na Figura 9 são apresentados os gráficos obtidos pela comparação entre os valores de  $\theta$  obtidos experimentalmente e aqueles estimados pelo modelo M3 para cada  $D_s$ . De um modo geral, pode-se verificar que embora este modelo seja “importado” de outro trabalho, sua habilidade em descrever o processo em estudo, para os diferentes valores de  $D_s$ , é muito semelhante ao que ocorre com o modelo M1, ajustado especificamente para os dados do presente trabalho, e também em relação ao modelo universal M2.

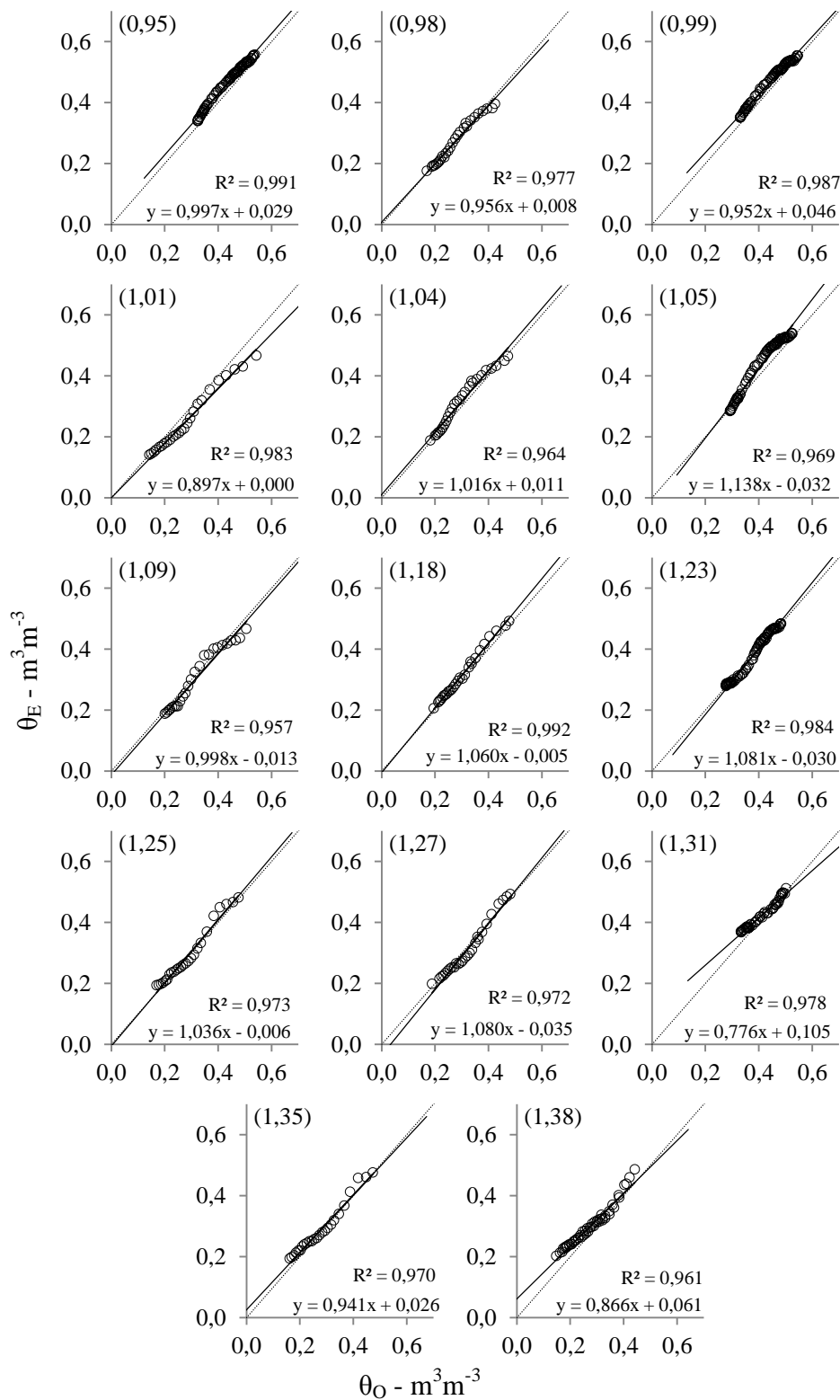


Figura 9 – Valores de  $\theta$  observados ( $\theta_O$ ) e estimados ( $\theta_E$ ) pelo modelo M3, modelo linear ajustado ( $y=a.x+b$ ) aos pares de valores, coeficiente angular (a), coeficiente linear (b) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para cada densidade do solo.

Na tabela 14 são apresentados os valores calculados para os modelos M4 a M8 para cada densidade do solo, dos coeficiente angular e linear, para o qual se estabelece máxima qualidade (precisão absoluta) em coeficiente angular igual à unidade e coeficiente linear igual a zero, e coeficiente de determinação, que expressa a habilidade do modelo em descrever os valores obtidos.

Para o modelo M4, mesmo que os valores de coeficiente de determinação ficaram entre 0,996 e 0,840, os coeficientes angulares revelam que todas as retas ajustadas apresentam forte inclinação em relação à reta 1:1, evidenciando que o modelo superestima os valores de  $\theta$  em uma região e subestima em outra, tornando o modelo M4 inadequado para a utilização nas condições do presente trabalho.

O modelo M5 apresenta, na média, os menores valores de coeficiente de determinação, que assume o valor mínimo de 0,473. De modo geral, as estimativas de umidade realizada pelo modelo M5 subestimam a umidade do solo, pois quando os valores de coeficiente angular apresentam valores acima de 0,600 o coeficiente linear apresentam valores negativos, e valores de coeficiente angular abaixo de 0,600 apresentam forte inclinação.

O modelo M6 apresenta a faixa de coeficiente de determinação semelhante ao modelo M4. Destaca-se para este modelo, os altos valores de coeficiente angular, que ultrapassam o valor de 2, evidenciando a forte inclinação das retas ajustadas para as densidades 0,95; 0,99 e 1,05. Essa inclinação é resultado dos altos valores  $K_a$  (Tabela 12), pois no modelo de M6 valores de  $K_a$  acima de 30, conforme a Figura 2, apresentam uma inclinação da curva  $\theta$  em função de  $K_a$  extremamente elevada.

Os modelos M5 e M6, como o modelo M4, apresentam-se inadequados para a utilização nas condições do presente trabalho.

Pode-se verificar que embora os modelos M7 e M8, que foram ajustados aos dados do presente trabalho, sua habilidade em descrever o processo em estudo, para os diferentes valores de  $D_s$ , é muito semelhante ao que ocorre com os modelos M1, M2 e M3.

Tabela 14 – Coeficientes angular, linear e de determinação para os modelos M4 a M8 em cada densidade do solo (Ds).

Ds	M4			M5			M6			M7			M8		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
0,95	0,489	0,146	0,894	1,256	-0,238	0,990	2,912	-0,603	0,901	0,993	0,003	0,991	1,000	0,000	0,999
0,98	0,437	0,160	0,903	0,254	0,082	0,611	1,134	0,018	0,910	0,975	0,008	0,977	0,981	0,006	0,984
0,99	0,502	0,139	0,925	1,208	-0,222	0,982	3,005	-0,649	0,933	0,991	0,004	0,987	1,000	0,000	0,997
1,01	0,422	0,143	0,923	0,283	0,091	0,473	1,219	-0,055	0,959	0,978	0,005	0,983	0,972	0,007	0,977
1,04	0,358	0,190	0,840	0,614	-0,008	0,894	1,096	0,054	0,928	0,959	0,012	0,964	0,986	0,004	0,991
1,05	0,452	0,162	0,977	1,306	-0,254	0,977	2,489	-0,410	0,956	0,973	0,011	0,969	0,997	0,001	0,994
1,09	0,372	0,171	0,878	0,547	0,005	0,887	1,110	0,010	0,937	0,956	0,015	0,957	0,977	0,008	0,977
1,18	0,354	0,193	0,964	0,782	-0,063	0,858	1,243	0,019	0,974	0,988	0,003	0,992	0,987	0,004	0,991
1,23	0,275	0,217	0,996	1,073	-0,188	0,958	1,181	0,017	0,945	0,984	0,006	0,984	0,983	0,007	0,983
1,25	0,388	0,176	0,977	0,634	-0,011	0,728	1,267	-0,002	0,992	0,978	0,007	0,973	0,982	0,005	0,977
1,27	0,381	0,175	0,994	0,760	-0,070	0,753	1,334	-0,036	0,954	0,966	0,010	0,972	0,976	0,007	0,983
1,31	0,227	0,240	0,840	1,018	-0,163	0,969	1,421	-0,071	0,828	0,982	0,008	0,978	0,999	0,001	0,994
1,35	0,353	0,189	0,978	0,554	0,009	0,674	1,124	0,047	0,980	0,971	0,008	0,970	0,985	0,004	0,984
1,38	0,319	0,208	0,971	0,488	0,023	0,617	0,960	0,112	0,926	0,955	0,012	0,961	0,985	0,004	0,991

#### 4.2.1 Avaliação da distribuição dos desvios de cada modelo

Com o propósito de se avaliar a distribuição dos desvios relativos à AD, em termos médios e em termos absolutos, conforme equações 12 e 13, os oito modelos selecionados para o presente trabalho foram organizados em dois grupos. Um deles contém os modelos que geraram os melhores resultados e são mais semelhantes entre si (Figura 2). Estes modelos foram caracterizados como estatisticamente iguais pelo teste de Tukey (Tabela 7). Também foram caracterizados como ótimos, de acordo com o índice de confiança (Tabela 9). Estes são os modelos M1, M2, M3, M7 e M8. No outro grupo tem-se os demais modelos importados, oriundos de outros trabalhos, ou seja, os modelos M4, M5 e M6. Estes modelos foram caracterizados como discrepantes do observado no teste de Tukey e os resultados apresentados na Tabela 11 revelam desvios médios da ordem de 40 a 135% da AD para os mesmos, evidenciando o forte viés que pode estar associado aos mesmos. Este grupo terá seus resultados abordados em primeiro lugar.

Na Figura 10 são apresentados os diagramas “box-plot” para as distribuições dos desvios médios relativos, para os modelos M4, M5 e M6, para cada um dos valores de  $D_s$  estabelecidos. Pode-se verificar nesta Figura que a amplitude dos desvios para cada modelo varia de forma intensa com a variação da  $D_s$  e que, em geral, estes valores de desvio médio variam entre 300% da AD inferior a cerca de 400% da AD superior que o valor medido da umidade do solo. Isto revela a inadequação destes modelos, independente do valor de  $D_s$ , evidenciando mais uma vez que a importação de um modelo desenvolvido para condições de solo supostamente semelhantes pode dar origem a erros absurdos de estimativa. Fica evidente que a análise dos desvios relativos, obtidos conforme equação 5, explicitaria discrepâncias ainda maiores das estimativas realizadas por este modelos, com valores que chegaram a atingir acima de 600% da AD, para algumas leituras.

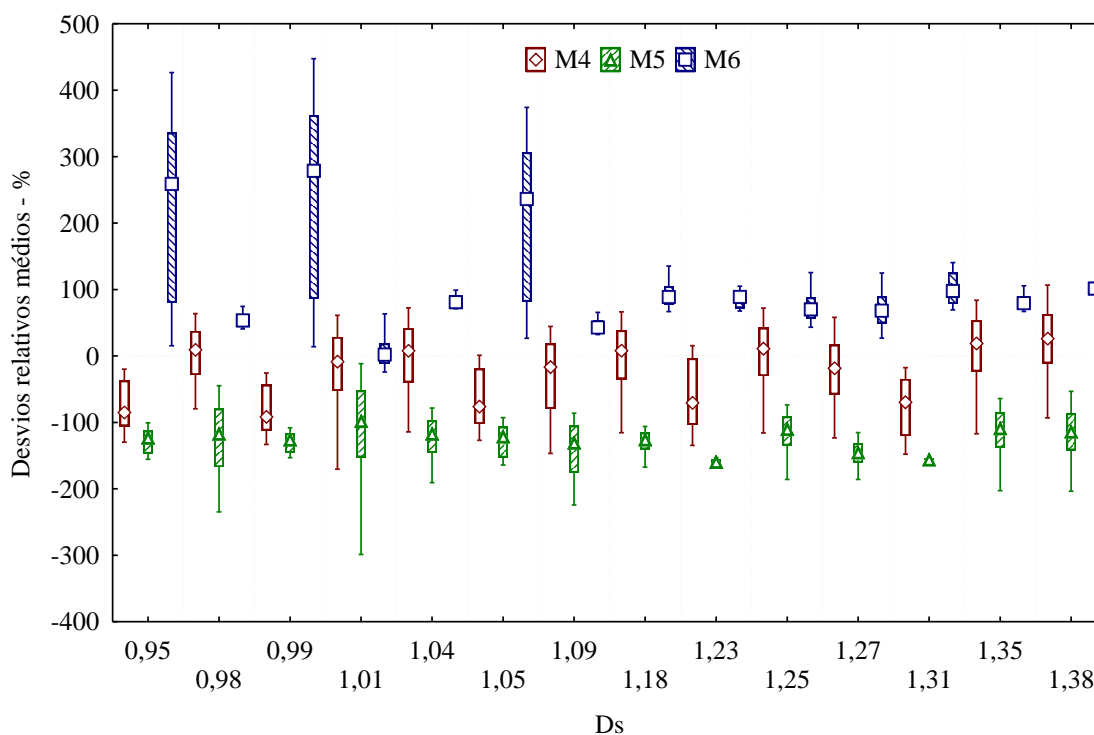


Figura 10 – “Box-plot” dos desvios relativos médios para os modelos M4, M5 e M6 para cada densidade do solo (Ds).

Na tabela 15 são apresentados os valores calculados para os modelos M4, M5 e M6 para cada densidade do solo, dos índices  $d$  de Willmott (1981), que expressa uma medida de exatidão do modelo, o coeficiente de correlação, que expressa uma medida da precisão do modelo e o índice  $c$ , que expressa um desempenho conjunto do modelo, também considerado um indicador de confiança.

De acordo com a classificação proposta na Tabela 3, o modelo M5 pode ser caracterizado como péssimo para os valores de  $D_s$  0,98 e 1,01. Para  $D_s$  entre 1,27 e 1,38, este modelo pode ser caracterizado com mau, sendo sofrível para  $D_s$  entre 1,04 e 1,25. O modelo M4 mostrou-se um pouco melhor para alguns valores de  $D_s$ , mas de um modo geral, os valores de  $c$  (Tabela 15) revelam sua forte inadequação. Situação semelhante se estabelece para o modelo M6, com duas exceções em termos de valores de  $D_s$ , para os quais o valor de  $c$  supera 0,9, caracterizando uma suposta adequação do modelo para a descrição do fenômeno. Mais uma vez reitera-se a perspectiva de que a aceitação deste critério de avaliação para a adoção de um modelo para utilização com a TDR pode conduzir a erros elevados de estimativa.



Tabela 15 – Índice de Willmott (d), de correlação (r) e de desempenho (c) para os modelos M4, M5 e M6 em cada densidade do solo (Ds).

Ds	M4			M5			M6		
	r	d	c	r	d	c	r	d	c
0,95	0,946	0,658	0,622	0,995	0,634	0,631	0,949	0,435	0,413
0,98	0,950	0,838	0,797	0,782	0,467	0,365	0,954	0,864	0,824
0,99	0,962	0,651	0,627	0,991	0,636	0,630	0,966	0,424	0,409
1,01	0,961	0,813	0,781	0,688	0,529	0,364	0,979	0,977	0,957
1,04	0,916	0,767	0,703	0,946	0,575	0,544	0,963	0,807	0,777
1,05	0,989	0,703	0,695	0,989	0,673	0,665	0,978	0,504	0,493
1,09	0,937	0,736	0,69	0,942	0,574	0,541	0,968	0,931	0,902
1,18	0,982	0,770	0,756	0,926	0,570	0,527	0,987	0,776	0,766
1,23	0,998	0,625	0,624	0,979	0,533	0,522	0,972	0,738	0,718
1,25	0,989	0,804	0,795	0,853	0,600	0,512	0,996	0,864	0,861
1,27	0,997	0,765	0,762	0,868	0,527	0,457	0,977	0,845	0,825
1,31	0,917	0,540	0,495	0,985	0,474	0,467	0,910	0,644	0,586
1,35	0,989	0,767	0,759	0,821	0,586	0,481	0,990	0,836	0,828
1,38	0,985	0,710	0,699	0,785	0,538	0,422	0,962	0,704	0,678

Para a avaliação das distribuições dos desvios relativos médios associados ao outro grupo de modelos, caracterizados como os melhores, dentre os selecionados, foram construídos os diagramas “box-plot” apresentados na Figura 11. Nesta Figura pode-se observar que, como seria esperado, os modelos M7 e M8 apresentam desvios relativos médios fortemente concentrados em torno do zero, para todos os valores de Ds. Evidentemente, como estas duas equações foram ajustadas para cada conjunto de dados individualmente, isto era o esperado. Este resultado mostra o que se encontra usualmente quando da utilização da TDR, ou seja, quando se toma um conjunto de dados obtidos com uma única sonda, em uma determinada instalação, e se correlacionam os valores de Ka com os valores de umidade medidos gravimetricamente, um modelo polinomial ou um modelo raiz quadrada possibilita a descrição da curva com qualidade ótima, para aplicações em geral. Cabe destacar, entretanto, que este não é um procedimento viável em termos práticos, sobretudo para a utilização da TDR em campo.

A Figura 11 permite constatar também que os modelos M1, M2 e M3 apresentam-se semelhantes, em termos das suas distribuições de desvios, com apenas a exceção de que o M1 para Ds de 1,01 apresentou uma cauda muito alongada à esquerda, caracterizando uma

assimetria negativa. Como isto ocorreu em apenas um valor de  $D_s$ , pode-se tratar de alguma questão específica para este conjunto de dados e não de uma tendência geral do modelo. Independente deste ponto específico, os modelos M1, M2 e M3 revelam uma amplitude dos desvios relativos médios inesperada, com valores da ordem de 50% da AD do solo, com valores superiores e inferiores ao zero, para os diferentes valores de  $D_s$ . Isto associa um grau elevado de incerteza a estes modelos, a despeito deles terem sido considerados adequados, à luz de critérios anteriormente empregados.

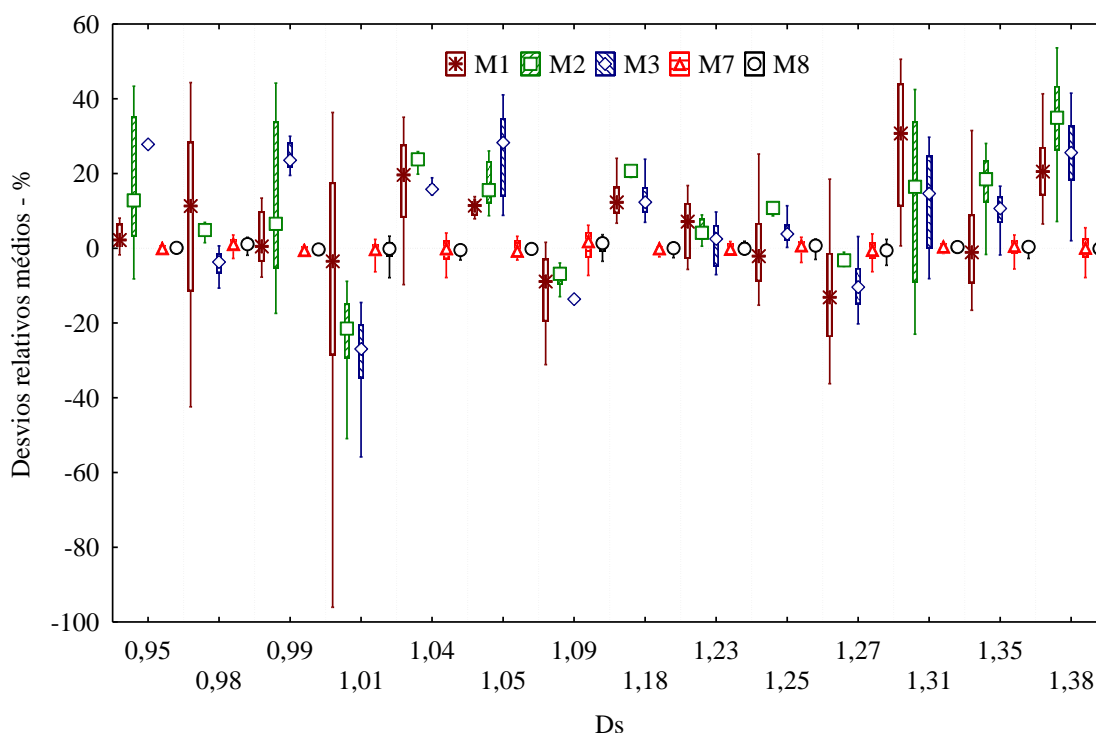


Figura 11 – “Box-plot” dos desvios relativos médios para os modelos M1, M2, M3, M7 e M8 para cada densidade do solo ( $D_s$ ).

A avaliação da qualidade dos modelos de acordo com o indicador de desempenho propostos por Camargo & Sentelhas (1997) foi realizada, buscando-se complementar a análise dos mesmos. Na Figura 12 são mostrados os valores do índice de desempenho ( $c$ ) calculado para cada modelo, em cada valor de  $D_s$ . Destaca-se os maiores valores obtidos para o M8, modelo polinomial ajustado a cada conjunto de dados, com valores sempre acima de 0,98, caracterizando ótima performance do mesmo. Esta performance é seguida de perto pelo modelo M7, cujos valores de  $c$  estão sempre acima de 0,97. Para os demais modelos verifica-se que na  $D_s$  de 1,31 M1 e M2 perdem qualidade de forma abrupta. Exceto nesta circunstancia, no entanto, os modelos M1, M2 e M3 podem ser caracterizados como de desempenho ótimo também.

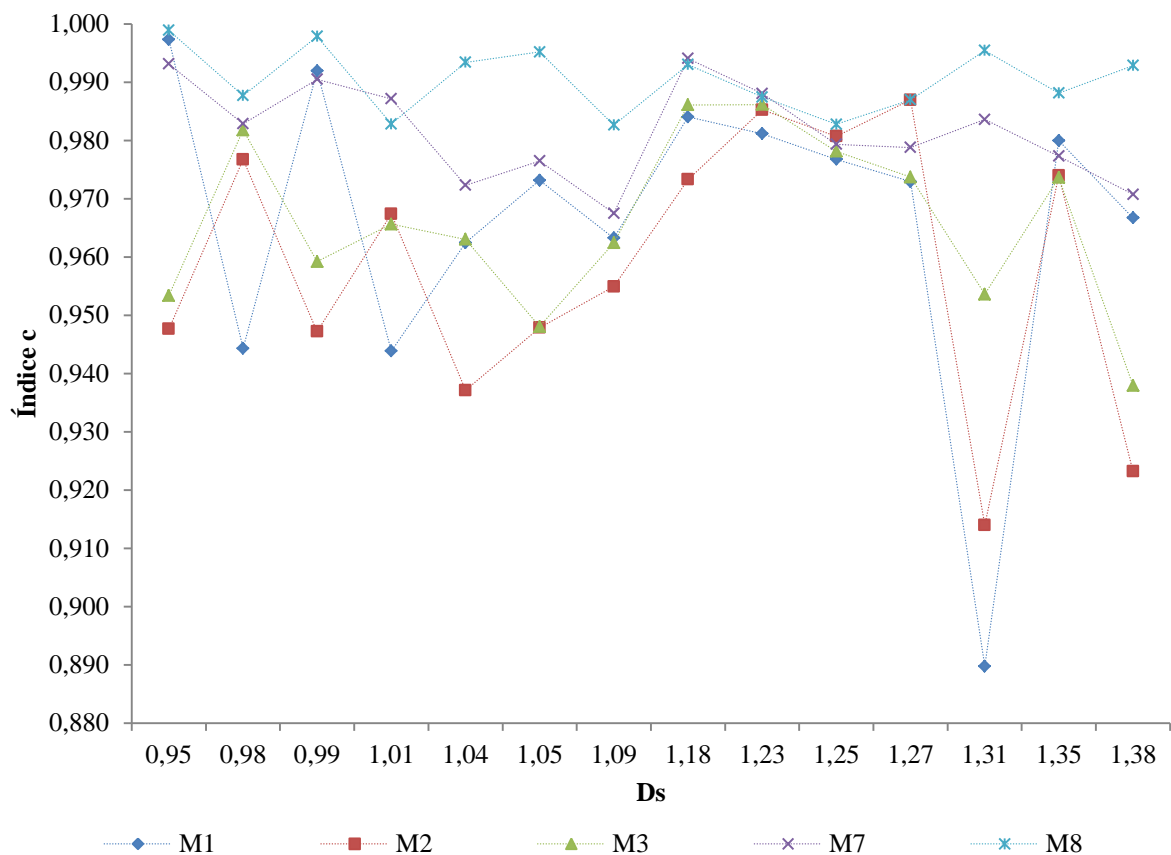


Figura 12 – Valores do Índice de desempenho (c) por densidade do solo (Ds), para cada modelo.

Uma avaliação mais elaborada do desempenho dos modelos pode ser obtida pela análise das distribuições dos valores dos desvios relativos à AD (equação 5). Na Figura 13 são apresentados os diagramas “box-plot” para estas distribuições, para cada valor de Ds empregado. Verifica-se que os modelos ajustados para as condições locais, para cada valor de Ds, apresentam amplitude proporcionalmente elevada de desvios. A amplitude destes desvios mostrada na Figura 13 é da ordem de 40% da AD para o M8, em termos médios, para os diferentes valores de Ds. Para os demais modelos, esta amplitude média é maior, atingindo valores da ordem de 60% da AD. Em resumo, mesmo com uma calibração local, definido-se um modelo para cada sonda em cada instalação individualmente, o que é inviável em termos práticos, uma estimativa de umidade feita com a TDR traz em si uma incerteza da ordem de cerca de 50% da água disponível, para o solo em estudo. Para um modelo de calibração geral, Esta incerteza pode atingir valores que superam 150% da água disponível no solo. O mesmo pode ser constatado caso se empregue o modelo universal de Topp et al. (1980) (M2).

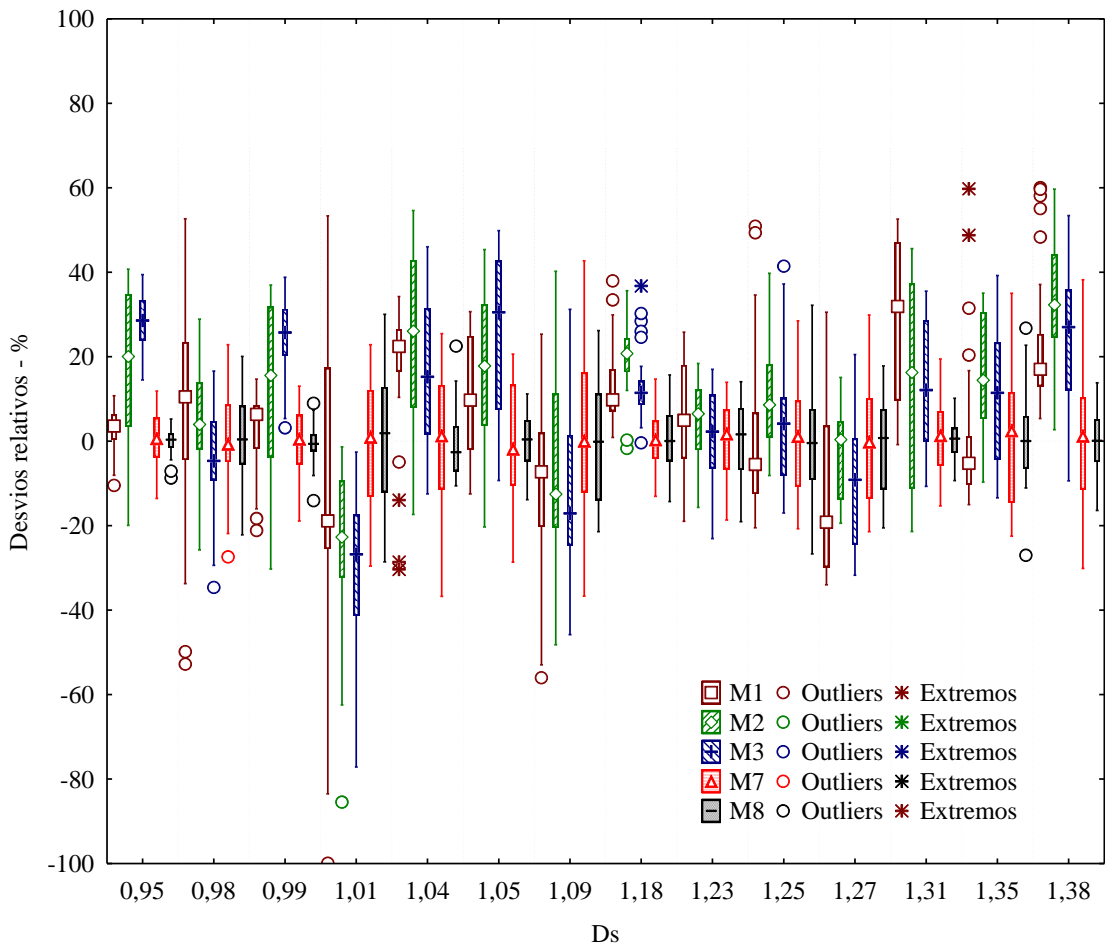


Figura 13 – “Box-plot” dos desvios relativos para os modelos M1, M2, M3, M7 e M8 para cada valor da densidade do solo (Ds).

Com o propósito de se identificar o número de medidas supostamente adequadas para se ter um grau mínimo de confiabilidade nas estimativas realizadas, empregou-se a equação 6, a qual permitiu o cálculo deste número, a partir dos valores de desvio padrão amostral para umidade do solo, apresentados na Tabela 5. Na Tabela 16 estes valores são apresentados.

Tabela 16 – Número de leituras de umidade e de respectivo valor de Ka necessários para se obter um determinado erro amostral, em um nível de confiança empregado.

erro amostral ( $m^3m^{-3}$ )	Nível de confiança ( $1-\alpha$ )								
	80%	85%	90%	95%	96%	97%	98%	99%	99,5%
0,001	16185	20412	26987	37851	41569	46396	53628	65331	77799
0,002	4046	5103	6747	9463	10392	11599	13407	16333	19450
0,003	1798	2268	2999	4206	4619	5155	5959	7259	8644
0,004	1012	1276	1687	2366	2598	2900	3352	4083	4862
0,005	647	816	1079	1514	1663	1856	2145	2613	3112
0,006	450	567	750	1051	1155	1289	1490	1815	2161
0,007	330	417	551	772	848	947	1094	1333	1588
0,008	253	319	422	591	650	725	838	1021	1216
0,009	200	252	333	467	513	573	662	807	960
0,010	162	204	270	379	416	464	536	653	778
0,015	72	91	120	168	185	206	238	290	346
0,020	40	51	67	95	104	116	134	163	194
0,025	26	33	43	61	67	74	86	105	124
0,030	18	23	30	42	46	52	60	73	86
0,035	13	17	22	31	34	38	44	53	64
0,040	10	13	17	24	26	29	34	41	49
0,045	8	10	13	19	21	23	26	32	38
0,050	6	8	11	15	17	19	21	26	31
0,055	5	7	9	13	14	15	18	22	26
0,060	4	6	7	11	12	13	15	18	22
0,065	4	5	6	9	10	11	13	15	18
0,070	3	4	6	8	8	9	11	13	16
0,075	3	4	5	7	7	8	10	12	14
0,080	3	3	4	6	6	7	8	10	12
0,085	2	3	4	5	6	6	7	9	11
0,090	2	3	3	5	5	6	7	8	10
0,095	2	2	3	4	5	5	6	7	9
0,100	2	2	3	4	4	5	5	7	8

Empregou-se na Tabela 16 valores de erro amostral variando entre  $0,001 m^3m^{-3}$  e  $0,100 m^3m^{-3}$ , ou seja, de 1% a 100% da água disponível apresentada pelo solo. A Tabela 16 permite constatar que para limitar o erro amostral na ordem de  $0,01 m^3m^{-3}$ , ou seja, em 10% da água disponível, com um nível de confiança de 95%, deve se realizar pelo menos 379 leituras.

O presente trabalho teve 624 leituras realizadas para os valores de  $\theta$  e sua respectiva

Ka e os erros apresentados para os modelos ajustados aos dados do presente trabalho, raiz e polinomial, apresentaram um intervalo de aproximadamente 14% (Tabela 10), ou seja, 7% com erros positivos e negativos. Conforme a Tabela 16 para se obter um erro amostral de 7 %,  $0,007 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ , a um nível de confiança de 90% e 95%, se faz necessário realizar 551 e 772 leituras, respectivamente.

A utilização da TDR demanda a existência de um modelo de calibração para a conversão de uma leitura de Ka em uma correspondente umidade do solo. Os resultados obtidos no presente trabalho revelam que a importação de modelos oriundos de trabalhos desenvolvidos em outros ambientes, com solos de composição granulométrica semelhante, pode dar origem a erros absurdamente elevados, neste processo de estimativa. A utilização de um modelo de calibração local pode dar origem a resultados mais confiáveis. No entanto, mesmo assim é necessária muita cautela na interpretação dos indicadores de qualidade do ajuste. Os indicadores usualmente empregados em trabalhos divulgados ao longo das duas décadas mais recentes mostraram-se pouco hábeis para identificar grandes desvios nas estimativas. Assim como verificado no presente trabalho, indicadores atestando ótima qualidade de ajuste podem estar vinculados a erros de estimativa que superam 100% da água disponível do solo. A utilização de TDR no contexto das atividades de pesquisa, assim como em práticas de campo, deve ser acompanhada da compreensão das incertezas envolvidas nos processos de estimativa, as quais se mostraram inevitáveis no presente trabalho.

## CONCLUSÕES

A importação de um modelo ajustado para dados obtidos em outras condições, mesmo que para um solo de composição granulométrica semelhante, pode impor um nível de erro extremamente elevado, devendo ser definitivamente evitada;

Os indicadores estatísticos usualmente empregados para se avaliar a qualidade de ajuste de um modelo, estudados neste trabalho, revelaram-se insuficientes para atestar esta qualidade, uma vez que grandes erros de estimativa não foram detectados pelos mesmos;

Mesmo com calibração local e utilização de modelos incorporando variáveis locais, a análise de resíduos das estimativas revelou que os desvios apresentaram amplitude da ordem de 130% a até 700% da AD, conforme o modelo empregado;

Na melhor das circunstâncias (melhor modelo empregado em uma série de valores para um valor de  $D_s$ ), o desvio relativo à AD atinge valores da ordem de 50% desta AD. Assim, a utilização da TDR ainda está cercada de um nível de incerteza extremamente elevado, embora isto não tenha sido detectado em diversos trabalhos que avaliam a qualidade de ajuste de modelos de calibração de acordo com critérios usuais.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. A. B.; ANTONINO, A. C. D.; PIMENTEL, R. M. M.; LIRA, C. A. B. O.; LIMA, J. R. S. Influência da Densidade na Estimativa da Umidade Volumétrica em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Geografia Física**. n 5 p. 1056-1068, 2012.
- ANDRADE NETO, T. M.; COELHO, E. F.; SANTANA, J. A. V.; SANTANA JUNIOR, E. B.; ALVES, M. S. Potassium estimation in the soil solution based on electrical conductivity and soil water content. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 16, n. 6, Junho 2012.
- ANDRADE, C.L.T.; COSTA, E.L.; ALBUQUERQUE, P.E.P. Desenvolvimento e calibração de guias de onda para TDR. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.1, p.173-176, 2003.
- ANISKO, T.; NESMITH, D.S.; LINDSTROM, O.M. Time-domain reflectometry for measuring water content of organic growing media in containers. **HortScience** 29:1511–1513, 1994.
- ANNANDALE, J.G.; JOVANOVIĆ, N.Z.; CAMPBELL, G.S.; DU SAUTOY, N.; BENADE, N. A two-dimensional water balance model for micro-irrigated hedgerow tree crops. **Irrig Sci** 22, 157-170, 2003.
- ANTONINI, J. C. A.; SILVA, E. M.; OLIVEIRA, L. F. C.; SANOS, E. E. Modelo matemático para estimativa da temperatura média diária do ar no Estado de Goiás. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 44, n. 4, Abril 2009.
- ARAÚJO, E.M.; OLIVEIRA, J.B. de; ARAÚJO, E.M.; LEDO, E.R.F.; SILVA, M.G. Desempenho de métodos de estimativa de ETo correlacionados com a equação padrão Penman- Monteith FAO-56, em cidades do estado do Ceará. **Rev ACTA Tecnol**, v. 5, n. 2, 2010.
- BACHMAIR, S.; WEILER, M.; NÜTZMANN, G. Controls of land use and soil structure on water movement: Lessons for pollutant transfer through the unsaturated zone, **Journal of Hydrology**, v.369, n.3–4, p. 241-252, 2009.
- BARBOSA, E. E. M.; PRADO, R. L.; MENDES, R. M.; MARINHO, F. A. M. Estimativas do teor de umidade empregando o método GPR: uma avaliação comparativa em experimentos de laboratório e campo. **Rev. Bras. Geof.**, São Paulo, v. 28, n. 4, Dec. 2010.
- BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A. C. A.; TORMENA, C. A.; FOLEGATTI, M. V.; GUIMARÃES, R. M. L. Intervalo hídrico ótimo num NITOSSOLO VERMELHO distroférico irrigado. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, Apr. 2009.
- BOLFARINE, H.; BUSSAB, W. O. **Elementos de amostragem**. Porto Alegre: Bookman, 2005. 269 p.



- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997.
- CAMPBELL SCIENTIFIC, Inc. **Instruction Manual TDR 100**. Logan, Utah: Campbell Scientific, Inc., 2000-2007. Revision: 4/07.
- CASTRO, F. S.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; XAVIER, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v.14, n.8, 2010.
- 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.
- CICHOTA, R.; LIER, Q. J. V.; Avaliação no campo de um TDR segmentado para estimativa da umidade do solo. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 8, n. 1, Apr. 2004 .
- COELHO, E. F.; ANDRADE, C. L. T.; OR, D.; LOPES, L. C.; SOUZA, C. F. Desempenho de diferentes guias de ondas para uso com o analisador de umidade TRASE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.81-87. 2001.
- COELHO, E.F.; CALDAS, R.C.; SANTOS, D.B. & LEDO, C.A.S. Número e espaçamento entre hastes de guias de onda para medida de umidade do solo com TDR. **R. Bras. Eng. Agric. Amb.**, 7:215-220, 2003.
- COELHO, E.F.; OR, D. Modelo de distribuição de água e de potencial matricial no solo sob gotejamento com extração de água por raízes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.2, p.225-34, 1999.
- COELHO, E.F.; VELLAME, L.M. & COELHO FILHO, M.A. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **R. Bras. Eng. Agric. Amb.**, 9:475-480, 2005.
- 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. **R. Bras. Ci. Solo**, 30: 23 – 30. 2006.
- COSTA, W. A.; OLIVEIRA, C. A. S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo-vermelho-amarelo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, Abril. 2008.
- DA SILVA, F. F., WALLACH, R.; POLAK, A.; CHEN, Y. Measuring Water Content of Soil Substitutes with Time-domain Reflectometry (TDR). **J. Amer. Soc. Hort. Sci.** 123:734-737, 1998.
- DALTON, F. N.; HERKELRATH, W. N.; RAWLINS, D. S.; RHOADES, J. D. Time-Domain Reflectometry: Simultaneous Measurement of Soil Water Content and Electrical Conductivity with a Single Probe. **Science**, v.224, p.989-900, 1984.
- DALTON, F. N.; VAN GENUCHTEN, M. T. The time-domain reflectometry method for

- measuring soil water content and salinity. **Geoderma**, v.38, p.237-250, 1986.
- DANIEL, W. W. **Biostatistics** : a foundation for analysis in the health sciences. 9. ed. New York: Wiley, 2009.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic detection of soil moisture. Progress Report, 1. **Canadian Journal of Remote Sensin**, v.3, n.1, p.76-86, 1977.
- DORNELAS, K. D. S.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S.. Coeficientes médios da equação de Angström-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 41, n. 8, Agosto. 2006 .
- EVANS R.G., LARUE, J.; STONE, K.C.; KING, B.A. Adoption of site-specific variable rate sprinkler irrigation systems, **Irrigation Science**, 2012.
- FELLNER-FELDEGG, H. The measurement of dielectrics in the time domain. **Journal of Physics Chemicals**, v.73, p.616-623,1969.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia** (UFLA), v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.
- FRUEH, W.T.; HOPMANS J.W. Soil Moisture Calibration of a TDR Multilevel Probe in Gravely Soil. **Soil Science**, v.162, n.8, p.554-565, 1997.
- GONÇALVES, A. C. A. ; FOLEGATTI, M. V. ; SILVA, A. P. . Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central.. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.**, Viçosa, v. 23, p. 155-164, 1999.
- GONCALVES, A. C. A.; TRINTINALHA, M. A.; TORMENA, C. A.; FOLEGATTI, M. V. Influência da densidade do solo na estimativa da umidade em um NITOSSOLO VERMELHO distroférico, por meio da técnica de TDR. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa , v. 35, n. 5, Outubro, 2011 .
- HERKELRATH, W.N.; HAMBURG, S.P.; F. Murphy. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. **Water Resources Research**, v.27, p.857-864, 1991.
- HOEKSTRA, P.; DELANEY, A. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. **Journal of Geophysical Research**, v.79, p.1699-1708,1974.
- HOOK, W.R.; LIVINGSTON, N. J. Errors in converting time domain reflectometry measurements of propagation velocity to estimates of soil moisture content. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, p.35-41, 1996.
- KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & MINELLA, J.P.G. Dielectric constant obtainde from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **R. Bras. Ci. Solo**, v.34, p.649 – 658. 2010.
- KAMEYAMA, K. & MIYAMOTO, T. Measurement of solid phase permittivity for volcanic soils by time domain reflectometry. **Eur. J. Soil Sci.** 59: 1253 – 1259. 2008.
- LACERDA, R. D.; GUERRA, H. O. C.; JUNIOR, G. B.; CALVALCANTI, M.L.F.

- Avaliação de um TDR para determinação de água no solo. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.5, n1, p.1-12 2005.
- LEDIEU, J.; RIDDER, P.; CLERCK, P. & DAUTREBANDE, S. A method for measuring soil water moisture by time-domain reflectometry. **J. Hydrol.**, 88:319-328, 1986.
- LEITAO, M. M. V. B. R.; OLIVEIRA, G. M.; LEITAO, T. J. V. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da Paraíba. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 11, n. 6, Dez. 2007 .
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335p.
- LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O.; TUON, R.L. Gravimetric soil water content variability of a hydromorphic soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n.1, p. 1-12, 1996.
- LIMA, J. R. S.; DANTAS ANTONINO, A. C.; ANDRADE, A. P.; SOUZA, C.; SOARES, W. A.; SOUZA, E. S.; DA SILVA, I. F. Comparação da Sonda de Nêutrons e de Sensores Tipo TDR para a Determinação dos Componentes do Balanço Hídrico no Solo e Evapotranspiração do Feijão Caupi. **Agropecuária Técnica**, v.27, n.1, p.21–29. 2006.
- MANIERI, J. M.; VAZ, C. M. P.; DE MARIA, I. C. Sonda espiral de TDR para a medida da umidade no perfil do solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa , v. 31, n. 2, Apr. 2007 .
- MARTINS, F. B.; STRECK, N. A. Aparecimento de folhas em mudas de eucalipto estimado por dois modelos. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 42, n. 8, Ago. 2007.
- MILANI, D.I.C.; TAVARES, M.H.F.; CLEMENTINA, S. Calibração de sondas TDR em condições de laboratório. **R. Amb. Água**, 3:68-75, 2008.
- MINET, J.,S.; LAMBOT, G.; DELAIDE, J.A.; HUISMAN, H.; VEREECKEN; VANCLOOSTER M. A generalized frequency domain reflectometry modeling technique for soil electrical properties determination. **Vadose Zone J.** 9, 1063-1072, 2010.
- MOREIRA, M. C.; CECILIO, R. A.; PINTO, F. A. C.; PRUSKI, F. F. Desenvolvimento e análise de uma rede neural artificial para estimativa da erosividade da chuva para o Estado de São Paulo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa , v. 30, n. 6, Dez. 2006 .
- NADLER, A.; DASBERG, S.; LAPID, I. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soils columns. **Soil Science of America Journal**, v.55, p.938-943, 1991.
- NEWTON, R. W. **Microwave remote sensing and its applications to soil moisture detection**. Austin: Texas University, 1977. (College Station, Technical Report, RSC-81).
- NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review. **Comp. Electr. Agric.**, 31:213-237, 2001.
- OTTO, S.R.L. & ALCAIDE, M. Utilização do método TDR-tensiômetro na obtenção da curva de retenção de água no solo. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, 25:265-269, 2001.

- PEPIN, S.; LIVINGSTONE, N. J.; HOOK, W. R. Temperature-dependent errors in time domain reflectometry determinations of soil water. **Soil Science Society of America Journal**, v.59, p.38-43, 1995.
- PEREIRA, S.; OLIVEIRA FILHO, D.; MANTOVANI, E.C.; RAMOS, M.M.; MARTINS, J.H. Reflectometria no domínio do tempo na determinação do conteúdo de água no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.306–314, 2006
- PERSSON, M.; BERNDTSSON, R. Texture and Electrical Conductivity Effects on Temperature Dependency in Time Domain Reflectometry. **Soil Science Society of America Journal**, v.62, p.887-893, 1998.
- PUMPANEN, J. & ILVESNIEMI, H. Calibration of time domain reflectometry for forest soil humus layers. **Boreal Environ. Res.**, 10:589-595, 2005.
- REICHARDT, K. & TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. Barueri, Manole, 2004. 477p.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.13, p.211-216, 1988.
- ROBINSON, D.A.; JONES, S.B.; BLONQUIST, J.M. & FRIEDMAN, S.P. A physically derived water content/permittivity calibration model for coarse-textured, layered soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 69: 1372-1378. 2005.
- RODRIGUES, T.R.; BATISTA H. S.; CARVALHO, J. M.; GONÇALVES A. O.; MATSURA, E. E. Uniformidade de distribuição de água em pivô central, com a utilização da técnica TDR na superfície e no interior do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.2, p.187-191, 2001.
- ROTH, C. H.; MALICKI, M. A.; PLAGGE, R. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. **Journal of Soil Science**, v.43, p.1-13, 1992.
- ROTH, K.; SHULIN, R.; FLUHLER, H. & ATTINGER, W. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. **Water Res.**, 26:2267-2273, 1990.
- SANTANA, G. S.; COELHO, E. F.; SILVA, T. S. M.; RAMOS, M. M. Relação entre potássio na solução do solo, umidade e condutividade elétrica aparente do solo. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 11, n. 2, Abr. 2007.
- SANT'ANA, J. A. V.; COELHO, E. F.; SILVA JUNIOR, J. J.; SANTANA JUNIOR, E. B; VEINROMBER JUNIOR, L. A. A. Desempenho de sondas de TDR manufaturadas de diferentes comprimentos de hastes. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa , v. 36, n. 4, Ago. 2012.
- 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**. Dourados, 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 Ciência do Solo**, v.34, n.2, p.299-308, 2010.

SCHNEIDER, J.M. & FRATTA, D. Time-domain reflectometry - parametric study for the evaluation of physical properties in soils. **Canadian Geotechnol. J.**, 46:753-767, 2009.

SERRARENS, D.; MACLINTYRE, J. L.; HOPMANS, J.W.; BASSOI, L.H.; Soil moisture calibration of TDR multilevel probes. **Scientia Agricola**, v.57, n.2, p.349-354, 2000.

SILVA, E. L. & GERVÁSIO, E. S. Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água em diferentes camadas de um Latossolo Roxo Distroférico. **R. Bras. Eng. Agric. Ambiental**, v.3, n3, p.417-420.1999.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CAMARGO, M. B. . Variabilidade espacial do armazenamento e perda média diária de água pelo solo no sistema de semeadura direta em Campinas, SP. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, 2008 .

SKIERUCHA, W. The accuracy of soil moisture measurement by TDR technique. **Int. Agrophysics**, 14:417-426, 2000.

SOUSA, I. F.; SILVA, V. P. R.; SABINO, F. G.; NETTO, A. O. A.; SILVA, B. K. N.; AZEVEDO, P. V. Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do estado de Sergipe. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 14, n. 6, 2010 .

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para a estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 6, n. 1, p. 63-68, 2002.

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

SOUZA, E. A.; COELHO, E. F.; PAZ, V. P. S.. Distribuição da umidade num perfil de solo irrigado por gotejamento superficial e subsuperficial. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 31, n. 4, Ago. 2007 .

STATSOFT, Inc. **STATISTICA** (data analysis software system), version 8.0. 2007.

SYPERRECK, V.L.G. KLOSOWSKI, E. S.; GRECO, M.; FURLANETTO, C. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.30, p.603-609, 2008.

TAVARES, M.H.F.; FELICIANO, J.J.S. & VAZ, C.M.P. Análise comparativa de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. **Irriga**, 13:517-524, 2008.

TEIXEIRA, W. G.; SCHROTH, G.; MARQUES, J.D.; HUWE, B. Sampling and TDR probe insertion in the determination of the volumetric soil water content. **R. Bras. Ci. Solo**, v27, p.575-582. 2003.

TOMMASELLI, J.T.G.; BACHI, 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.; DAVIS, J.L. & ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Res.**, v.16, p.574-582, 1980.
- 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.
- TRINTINALHA, A. T.; GONGALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; TORMENA, C. A.; BERTONHA, A.; TSUKADA, J. Efeito da instalação e da variabilidade entre sondas no uso da técnica TDR em um NITOSSOLO VERMELHO Distroférico. **Acta Scientiarum**, v.23, p.1165-1171. 2001.
- TRINTINALHA, M.A. **Avaliação da técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) na determinação da umidade em um NITOSSOLO VERMELHO eutroférico.** Maringá, Universidade Estadual de Maringá, 2000. 64p. (Tese de Mestrado)
- TRINTINALHA, M.A.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; COSTA, A.C.S.; FOLEGATTI, M.V.; FREITAS, P.S.L. & REZENDE, R. Comparação dos sistemas TDR e ECHO para medida de umidade, em um solo argiloso e em areia. **Acta Sci.**, 26:353-360, 2004.
- VALERO, R. M. M.; MATSURA, E. E.; SOUZA, A. L. Caracterização física de dois substratos orgânicos para plantas e a estimativa da umidade por meio da reflectometria no domínio do tempo. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 2, Apr. 2009 .
- VIEIRA, S. R.; GREGO, C. R.; TOPP, G. C. Analyzing spatial and temporal variability of soil water content. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 2, 2008.
- VILLWOCK, R.; TAVARES, M.H.F. & VILAS BOAS, M.A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. **Irriga**, 9:82-88, 2004.
- WANG, J.R. The dielectric properties of soil water mixtures at microwave frequencies. **Radio Science**, v.15, p.977-985, 1980.
- WEAST, R. C. (ed.) 1986. **Handbook of physics and chemistry**, 67th ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, p.184-194, 1981.