

ALEX ELPIDIO DOS SANTOS

**QUALIDADE DA ESTIMATIVA DA UMIDADE, UTILIZANDO TDR,
EM FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA E DA
DENSIDADE DO SOLO**

MARINGÁ
PARANÁ – BRASIL
ABRIL – 2013

ALEX ELPIDIO DOS SANTOS

**QUALIDADE DA ESTIMATIVA DA UMIDADE, UTILIZANDO TDR,
EM FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA E DA
DENSIDADE DO SOLO**

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

MARINGÁ
PARANÁ – BRASIL
ABRIL – 2013

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

S156q Santos, Alex Elpidio
Qualidade da estimativa da umidade, utilizando TDR, em função da composição granulométrica e da densidade do solo/ Alex Elpidio dos Santos. -- Maringá, 2013.
56 f. il. : 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. Umidade do solo - TDR. 2. Densidade do solo. 3. Composição granulométrica. 4. Curvas de calibração da TDR. 5. Região Noroeste do Paraná. I. Gonçalves, Antônio Carlos Andrade, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Agrárias. Departamento de Agronomia. III. Título.

CDD 22. ED.631.587

JLM-001333

ALEX ELPIDIO DOS SANTOS

**QUALIDADE DA ESTIMATIVA DA UMIDADE, UTILIZANDO TDR, EM
FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA
E DA DENSIDADE DO SOLO**

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

APROVADA em 19 de abril de 2013.

Prof. Dr. Antonio Carlos Andrade Gonçalves
Presidente

Prof^ª. Dr^ª. Maria Hermínia Ferreira Tavares
Membro

Prof. Dr. Paulo Sérgio Lourenço de Freitas
Membro

Prof. Dr. Roberto Rezende
Membro

Aos meus pais, pelos conselhos, sacrifícios e dedicação que me possibilitaram
chegar até aqui.

Aos meus avós, pelo exemplo de luta e perseverança.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste
trabalho.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por sua misericórdia e proteção. Sem Ele eu nada seria.

À minha mãe Lorentina D. P. dos Santos, por uma vida de dedicação e luta, pelos bons exemplos e pela educação, que sempre me mantiveram no bom caminho.

Ao meu saudoso pai Elias dos Santos (*in memorian*), pela dedicação e pelos bons conselhos que sempre me acompanharam.

Aos meus avós, Maria Porcellani e Antônio Porcellani (*in memorian*), verdadeiros alicerces da família, por seu apoio, principalmente nos momentos mais difíceis.

À Universidade Estadual de Maringá, pelas instalações e suporte para o desenvolvimento e execução deste trabalho e a todos os professores e funcionários, pelo empenho em proporcionar um ensino de qualidade.

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, pela oportunidade de realização do Curso de Mestrado.

Aos Professores do Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá - PGA/UEM.

Em especial agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Antônio Carlos Andrade Gonçalves, pela amizade, conselhos, disponibilidade e auxílio durante a realização deste trabalho e toda minha vida acadêmica.

Aos funcionários da Secretaria do Programa de Pós-graduação em Agronomia, que sempre me atenderam com respeito e amizade, prontamente ajudando a resolver os procedimentos administrativos.

A todos os funcionários da Universidade Estadual de Maringá, em especial aos funcionários do Centro de Treinamento em Irrigação e Drenagem (CTI) e do Departamento de Agronomia que contribuíram para a implantação e manejo do experimento, permitindo o estudo dos resultados alcançados.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

A todos os amigos com os quais tive a honra e felicidade de conviver ao longo dessa inesquecível jornada.

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização e sucesso desse trabalho.

A todos, minha eterna gratidão.

BIOGRAFIA

Alex Elpidio dos Santos nasceu na cidade de Maringá, Estado do Paraná, em Dezembro de 1976, filho de Lorentina D. P. dos Santos e Elias dos Santos.

Cursou o primeiro e segundo graus em Maringá.

Residiu na Inglaterra entre Julho de 2000 e Janeiro de 2007, estudando Inglês e conquistando certificado de nível avançado, conferido pela Universidade de Cambridge (*ESOL Examinations*).

Engenheiro Agrônomo, graduado pela Universidade Estadual de Maringá em 29 de Janeiro de 2011.

Em Março de 2011, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, em nível de Mestrado (área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas – Física e Manejo do Solo e da Água) sob a orientação do Professor Doutor Antônio Carlos Andrade Gonçalves.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 – ÁGUA NO SOLO	6
2.2 – TEXTURA E EXTRUTURA DO SOLO.....	8
2.3 – DENSIDADE DO SOLO	9
2.4 – ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO	10
2.5 – REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO - TDR	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5. CONCLUSÕES.....	48
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Triângulo de classificação textural de solos.	9
Figura 2 –	Relação entre umidade do solo e respectiva constante dielétrica para o conjunto de dados experimentais e modelos M1 e M2.	29
Figura 3 –	Valores de θ observados (θ_O) e estimados (θ_E) pelos modelos a) M1 e b) M2 e modelo linear ajustado aos pares de valores referentes ao conjunto de dados.	32
Figura 4 –	Valores de θ observados (θ_O) e estimados (θ_E) pelos modelos a) M3 e b) M4 e modelo linear ajustado aos pares de valores referentes ao conjunto de dados.	34
Figura 5 –	Umidade do solo (θ) e K_a para a posição inferior na topossequência (conteúdo de argila no solo de 70%).	36
Figura 6 –	Valores de θ observados (θ_O) e estimados (θ_E) pelos modelos a) M2 e b) M3 e modelo linear ajustado aos pares de valores referentes à posição inferior.	38
Figura 7 –	Umidade do solo (θ) e K_a para a posição intermediária na topossequência (conteúdo de argila no solo de 48%).	39
Figura 8 –	Valores de θ observados (θ_O) e estimados (θ_E) pelos modelos a) M2 e b) M3 e modelo linear ajustado aos pares de valores referentes à posição intermediária na topossequência (conteúdo de argila no solo de 48%).	41
Figura 9 –	Umidade do solo (θ) e K_a para a posição superior na topossequência (conteúdo de argila no solo de 14%).	43
Figura 10 –	Valores de θ observados (θ_O) e estimados (θ_E) pelos modelos a) M2 e b) M3 e modelo linear ajustado aos pares de valores referentes à posição superior na topossequência (conteúdo de argila no solo de 14%).	44
Figura 11 –	Modelo M2 ajustado ao conjunto de dados e a cada posição na topossequência, individualmente.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios para análise de desempenho de modelos por meio do índice “c”	23
Tabela 2 – Conteúdo de Areia, Silte e de argila do solo, nas posições selecionadas na topossequência	24
Tabela 3 – Estatística descritiva dos valores de umidade do solo (θ), expressa em m^3m^{-3} , constante dielétrica (Ka), e Densidade do solo (Ds), expressa em Mgm^{-3} , para as posições em estudo.....	25
Tabela 4 – Coeficientes do modelo M2 (representado pela Equação 4) para o conjunto de dados e para cada série de dados referente às posições estudadas	26
Tabela 5 – Coeficientes do modelo M3 (representado pela Equação 5) para o conjunto de dados e para cada série de dados referente às posições estudadas	27
Tabela 6 – Coeficientes do modelo M4 (representado pela Equação 6) para o conjunto de dados referente às posições estudadas.....	28
Tabela 7 – Valores do coeficiente de concordância “d” (WILLMOTT, 1981), coeficiente de correlação “r” e do índice de desempenho “c” para os modelos M1 e M2, ajustados ao conjunto dos dados.....	31
Tabela 8 – Valores do coeficiente angular (a), linear (b) e de determinação (R^2) para os modelos M1 e M2, ajustados ao conjunto dos dados.....	32
Tabela 9 – Valores do coeficiente de concordância “d” (WILLMOTT, 1981), coeficiente de correlação “r” e do índice de desempenho “c” para os modelos M3 e M4, ajustados ao conjunto dos dados.....	33
Tabela 10 – Valores do coeficiente angular (a), linear (b) e de determinação (R^2) para os modelos M3 e M4, ajustados ao conjunto de dados	34
Tabela 11 – Valores do coeficiente de concordância “d” (WILLMOTT, 1981), coeficiente de correlação “r” e do índice de desempenho “c” para os	

	modelos M2 e M3, ajustados à posição inferior na topossequência (conteúdo de argila no solo de 70%).....	37
Tabela 12 –	Valores do coeficiente angular (a), linear (b) e de determinação (R ²) para os modelos M2 e M3, ajustados à posição inferior na topossequência (conteúdo de argila no solo de 70%)	38
Tabela 13 –	Valores do coeficiente de concordância “d” (WILLMOTT, 1981), coeficiente de correlação “r” e do índice de desempenho “c” para os modelos M2 e M3, ajustados à posição intermediária na topossequência (conteúdo de argila no solo de 48%)	40
Tabela 14 –	Valores do coeficiente angular (a), linear (b) e de determinação (R ²) para os modelos M2 e M3, ajustados à posição intermediária na topossequência (conteúdo de argila no solo de 48%)	41
Tabela 15 –	Valores do coeficiente de concordância “d” (Willmott, 1981), coeficiente de correlação “r” e do índice de desempenho “c” para os modelos M2 e M3, ajustados à posição superior na topossequência (conteúdo de argila no solo de 14%).....	43
Tabela 16 –	Valores do coeficiente angular (a), linear (b) e de determinação (R ²) para os modelos M2 e M3, ajustados à posição superior na topossequência (conteúdo de argila no solo de 14%)	45

RESUMO

SANTOS, A. E. dos, M.e. Universidade Estadual de Maringá, Abril de 2013. **Qualidade da estimativa da umidade, utilizando TDR, em função da composição granulométrica e da densidade do solo.** Professor Orientador: Dr. Antônio Carlos Andrade Gonçalves.

A estimativa da umidade do solo é de elevada importância para se tomar decisões técnicas e econômicas na agricultura irrigada. Dentre os métodos utilizados para determinar a umidade do solo, a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (*Time Domain Reflectometry* - TDR) tem se destacado por permitir estimativas rápidas, de forma não destrutiva, e supostamente com elevada confiabilidade, possibilitando estabelecer, de maneira mais criteriosa, o momento mais adequado para se irrigar, bem como a quantidade de água a ser aplicada. Embora tenha sido aceito, nos primeiros anos de utilização da técnica, que um modelo universal pudesse ser empregado, diversos trabalhos têm demonstrado que esta técnica é suscetível à ação de variáveis relacionadas ao meio, o que torna imprescindível a realização de uma calibração. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes composições granulométricas do solo, em diferentes valores de densidade, sobre as curvas de calibração. Amostras foram obtidas em três posições em uma topossequência: no topo da encosta, no fundo do vale e em uma posição intermediária, o que acarretou uma variação de conteúdo de argila de 10% a 70%. Verificou-se que a variação da composição granulométrica influenciou a calibração da TDR, evidenciando, dessa forma, que a qualidade de um modelo único é inaceitável. Observou-se ainda que os indicadores de avaliação mais recentemente utilizados foram pouco hábeis para descrever a qualidade do ajuste dos modelos. A análise de resíduos dos modelos revela que um modelo, mesmo apresentando ajuste considerado ótimo pelos indicadores de avaliação, pode apresentar erros de estimativa da água disponível no solo da ordem de 50%. Concluiu-se, portanto, que a incorporação de variáveis físicas do

solo, tais como a textura e densidade do solo, ao modelo, promove estimativas de umidade mais próximas da realidade.

Palavras-chave: Curvas de calibração da TDR, Granulometria, Umidade do solo.

ABSTRACT

SANTOS, A. E. dos, M.S. State University of Maringá, April 2013. **Quality of soil moisture estimate using TDR, as a function of soil granulometric composition and density.** Adviser: Dr. Antônio Carlos Andrade Gonçalves.

Soil moisture estimate is highly important to make technical and economical decisions in irrigated agriculture. Among the methods used to measure the soil moisture, the Time Domain Reflectometry (TDR) technique stands out because it allows quick, nondestructive estimates, and supposedly with high reliability. It allows establishing with more accuracy the appropriate moment to irrigate, as well as the right amount of water to be applied. Although it was accepted in the early years of use of the technique that a universal model could be employed, several studies have shown that this technique is susceptible to soil related variables, which makes it essential to carry out a calibration. This study aimed to evaluate the effect of different granulometric compositions at different density values on the calibration curves. Samples were taken at three positions in a toposequence: at the top of the slope, at the bottom of the valley and in an intermediate position, which led to a clay content variation of 10% to 70%. It was verified that the granulometric composition variation influenced the TDR calibration, showing that the quality of a single model is unacceptable. It was also observed that the most recent assessment indicators used were not capable enough to describe the quality of the model adjustment. Residual analysis of the models shows that a model with an adjustment considered optimal by the evaluation indicators can display errors of available soil water estimation in the order of 50%. It was concluded therefore that the incorporation of physical variables of the soil, such as texture and soil density, to the model promotes moisture estimates closer to reality.

Keywords: TDR calibration curves, Granulometry, Soil moisture.

1. INTRODUÇÃO

As diferentes características físicas dos solos exercem influencia sobre a capacidade destes de armazenar água, bem como sobre as variáveis que dizem respeito à disponibilidade desta água para a utilização pelas plantas, no processo de transpiração.

No contexto da agricultura irrigada, o valor da umidade do solo constitui uma importante informação para a tomada de decisões de natureza técnica e econômica. Pode-se considerar que o principal objetivo da irrigação é fornecer uma quantidade adequada de água ao solo, para prevenir o estresse hídrico das culturas, pois este pode afetar, tanto de forma quantitativa quanto qualitativa, sua produção. A quantidade de água requerida e o momento de aplicação são parâmetros governados pelas condições climáticas locais, pelas características das culturas e pela umidade do solo.

São vários os métodos de determinação da umidade no solo, os quais podem ser classificados como métodos diretos ou métodos indiretos. Como método direto, por exemplo, tem-se o método gravimétrico. Os métodos indiretos são aqueles por meio dos quais se torna possível determinar a quantidade de água presente no solo utilizando medidas de características dos mesmos, relacionadas com a umidade. Dentro dos métodos indiretos, destaca-se a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (*Time Domain Reflectometry* - TDR), que mede a constante dielétrica aparente do solo (K_a), a partir da medida do tempo de viagem de um pulso eletromagnético em uma sonda metálica, de comprimento determinado, cravada no solo na profundidade desejada. Este valor é relacionado com os valores de umidade base volume (θ), fazendo-se o uso de curvas de calibração, ou seja, de modelos matemáticos ajustados. A TDR tem sido empregada em meios porosos desde que Topp et al. (1980) propuseram uma relação empírica entre estas variáveis.

A utilização de ondas eletromagnéticas apresenta grande versatilidade e diversos trabalhos têm demonstrado a existência de várias possibilidades de

aplicação da reflectometria de micro-ondas. Dentre as diversas possibilidades de aplicação, do ponto de vista agrônomo, a de maior interesse para a irrigação seria a determinação do conteúdo de água do solo.

A evolução do conhecimento acerca do emprego desta técnica levou à compreensão de que diversas características locais, inerentes ao solo, podem induzir a erros de estimativa da umidade do solo. Neste contexto, entende-se que as propriedades do solo dependem de sua composição granulométrica, bem como da constituição mineralógica de cada fração, assim, a composição granulométrica do solo pode influenciar a constante dielétrica. Tal influencia pode levar a erros consideráveis na estimativa da umidade do solo pelo método da TDR.

Dentre os trabalhos existentes na literatura, merecem especial destaque aqueles que mostram expressiva influencia da densidade do solo sobre a curva de calibração da TDR. Frente a essas evidências, não se pode mais ignorar que, em algumas situações, é imprescindível a incorporação da densidade do solo no modelo de calibração, como forma de incrementar a qualidade da estimativa de umidade realizada. Por outro lado, conforme as condições locais, o modelo matemático empregado para descrever a relação entre umidade do solo e constante dielétrica do mesmo, pode variar consideravelmente, não apenas nos coeficientes de um modelo, mas na própria expressão destes. Neste sentido, tem-se encontrado modelos lineares, quadráticos, cúbicos, raiz quadrada, dentre outros, como adequados para esta calibração.

Considerando o conhecimento acumulado até o presente, sobre o emprego da TDR, considerando também que solos tropicais têm sido muito menos estudados que os de regiões temperadas, em relação ao emprego desta técnica, a condução deste trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes composições granulométricas do solo, em diferentes valores de densidade, sobre as curvas de calibração. Estabeleceu-se a hipótese de que a composição granulométrica, assim como a densidade do solo, pode impor variações expressivas no modelo de calibração a ser empregado, podendo inclusive acarretar na necessidade do emprego de diferentes modelos

matemáticos, para a descrição da curva de calibração de forma confiável, nas diferentes circunstâncias avaliadas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Os impactos ambientais produzidos pelo homem e suas consequências para as futuras gerações têm sido discutidos por integrantes de diversos setores da sociedade, ao longo de vários anos. Nas últimas duas décadas, em particular, essa questão passou a ser considerada problema fundamental e principal desafio para a sociedade contemporânea. Nesse contexto, um assunto em particular ganhou enorme visibilidade pública e, jamais em nossa história recente, esteve tão presente nos debates, tanto de especialistas quanto do público em geral: a sustentabilidade. Observa-se que esse é um assunto que se tornou impossível de ser ignorado, mesmo por aqueles que, há pouco tempo, se negavam a discuti-lo. Prova disso foi a Rio+20, Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, que ocorreu na cidade do Rio de Janeiro de 13 a 22 de junho de 2012 e contou com a participação de líderes dos 193 países que fazem parte da ONU (Organização das Nações Unidas). Uma das principais discussões na Rio+20 foi o uso racional dos recursos, em especial a água e o estabelecimento de ações para garantir o desenvolvimento sustentável do planeta. Segundo a ONU BRASIL (2012), a agricultura responde por quase 70% da retirada dos recursos hídricos globais. O incremento da eficiência de irrigação, que pode ser entendido como maior produção por unidade de água utilizada, e a reutilização da água, constituem estratégias que podem estabelecer uma considerável revolução neste setor. Albuquerque & Durães (2008) destacam que os recursos hídricos estão se tornando cada vez mais escassos, requerendo estudos mais criteriosos sobre a produtividade, a racionalização e o uso mais eficiente da água.

No contexto da agricultura irrigada, o desenvolvimento de novos equipamentos e o aperfeiçoamento de técnicas exige cada vez mais o olhar atento do profissional sobre os fatores que constituem o sistema solo-planta-atmosfera. Em especial, no monitoramento da umidade do solo, encontram-se indicadores físicos que assumem importância por estabelecerem relações fundamentais com

os processos hidrológicos, tais como a taxa de infiltração, escoamento superficial, drenagem e erosão. Tais indicadores interferem no suprimento e armazenamento de água, de nutrientes e de oxigênio no solo (COELHO et al., 2009).

Carvalho et. al. (2004) propõem que a qualidade física do solo pode ser avaliada por meio de indicadores relacionados à forma (densidade e porosidade do solo), ou ainda pela estabilidade estrutural (estabilidade de agregados), onde o principal indicador físico da qualidade concentra-se na textura ou granulometria do solo, composta pelas frações de areia, silte e argila.

Segundo Casanelas et al. (1999), para fins agronômicos, a granulometria expressa as proporções relativas das diferentes partículas minerais menores que 2,0 mm, agrupadas por classe de frações granulométricas, após a destruição dos agregados.

A formação e a estabilização dos agregados do solo ocorrem mediante a atuação de processos físicos, químicos e biológicos nos quais são envolvidas substâncias que agem na agregação e na estabilização (SILVA & MIELNICZUK, 1997). A predominância do íon cálcio no complexo de troca promove a floculação adequada das argilas e contribui para intensa atividade biológica que favorece a formação de agregados. Por outro lado, a predominância de sódio ou potássio no complexo de troca, ocasiona a dispersão excessiva dos colóides, resultando na perda da estabilidade dos agregados (FASSBENDER, 1986).

O solo é constituído por três fases: sólida, líquida e gasosa. A fase sólida ocupa cerca de 50% do volume do solo e é composta por uma fração mineral e uma orgânica. Na fração mineral encontram-se partículas sólidas de formas e tamanhos variáveis, que são classificadas, de acordo com o seu diâmetro, em frações granulométricas (BRADY & WEIL, 2002). Os agregados do solo, por sua vez, são definidos por Santos et al. (2005) como uma agregação de partículas primárias que irão compor a estrutura do solo.

O armazenamento de água e minerais, bem como a falta de impedância ao desenvolvimento radicular constituem as características mais importantes para

o desenvolvimento das plantas. Tais características dependem diretamente da textura e estrutura do solo. Adicionalmente, o solo se apresenta como um sistema complexo, consistindo de proporções variáveis de partículas rochosas e matéria orgânica, que formam a matriz sólida, em conjunto com a solução do solo e ar, que ocupam os espaços porosos (KRAMER & BOYER, 1995).

2.1 – ÁGUA NO SOLO

A água é um componente essencial para a agricultura, pois afeta diretamente o crescimento, o desenvolvimento e a produção das culturas. O manejo racional da água na agricultura irrigada abrange tanto a sua reposição no perfil do solo, que pode ocorrer artificialmente, por meio de um sistema de irrigação, ou naturalmente, pela distribuição de precipitações pluviais, quanto a remoção de seu excesso. Uma das grandes dificuldades para se ajustar a programação das irrigações está no requerimento diferenciado de água pela cultura. Esse requerimento oscila em relação às variações das condições ambientais e no decorrer do ciclo fenológico da cultura. Há de se ressaltar que essa dificuldade é agravada quando se procura conjugar irrigações com outras práticas culturais (ALBUQUERQUE & DURÃES, 2008).

A taxa de infiltração e a capacidade de retenção da água de um solo podem estar diretamente relacionadas à sua composição. Solos arenosos apresentam infiltração mais rápida e pouca retenção da água devido ao predomínio de macroporos, que permitem a drenagem livre da água do solo por gravidade. Solos argilosos, entretanto, apresentam infiltração mais lenta e maior retenção de água devido à maior presença de microporos, os quais retêm a água por capilaridade. No entanto, solos argilosos bem estruturados podem apresentar taxa de infiltração tão alta quanto a dos solos arenosos (FAGUNDES et al., 2012). Ou ainda, solos argilosos bem estruturados podem apresentar maior condutividade hidráulica que solos com estrutura instável, apresentando assim, maior taxa de infiltração.

Além de participar ativamente do metabolismo do vegetal e da composição e atividades dos micro-organismos presentes no solo, a água funciona como solvente dos nutrientes do solo e como meio de transporte destes até a planta. Além disso, através da transpiração vegetal, a água atua evitando o dessecamento das folhas (KLAR, 1984).

Segundo Reichardt (1996), o comportamento da água no solo é determinado principalmente pelos potenciais gravitacional, matricial, osmótico e de pressão da água. Essas forças atuam sobre a energia livre da água do solo. O potencial matricial atua no armazenamento da água no solo pelas forças de adesão ou atração entre as moléculas de água e as partículas de solo. O potencial gravitacional é observado quando a água é perdida por lixiviação ou não é absorvida pelo solo e se perde por erosão superficial. O potencial osmótico refere-se à presença de solutos no solo. O potencial de pressão faz-se importante quando existe uma lâmina de água que proporciona uma carga hidráulica.

Bertol et al. (2000), consideram a taxa de infiltração de água no solo como um bom indicativo da qualidade física do solo. Sua redução a níveis muito baixos aumenta o risco de erosão e de déficit hídrico e nutricional nas plantas, fazendo com que as raízes se desenvolvam superficialmente, conseqüentemente, diminuindo sua produtividade (ROSOLEM et al., 1994; MORAES et al., 1995).

Reichardt (1996) descreve que a condutividade hidráulica depende do espaço poroso e varia enormemente tanto de um solo para outro, como também dentro de um mesmo solo, devido a variações estruturais, compactação e espessura dos horizontes.

A quantidade de silte presente no solo pode influenciar na infiltração de água, uma vez que este apresenta baixo potencial para formar agregados. Normalmente, o aumentando da proporção de silte em um solo leva à redução da taxa de infiltração, haja vista que esta fração apresenta pequeno tamanho, o que facilita seu deslocamento para camadas mais profundas do solo onde pode causar o entupimento dos poros.

A pedregosidade também pode influenciar a infiltração de água. Segundo Epstein et al. (1966) e Sauer & Logsdon (2002), as pedras podem funcionar

como “*mulching*” interceptando e dissipando a energia das gotas de chuva, diminuindo o selamento superficial. Além disso, a presença das pedras faz com que o solo tenha maior quantidade de espaço poroso não capilar, o que aumenta a infiltração de água.

2.2 – TEXTURA E EXTRUTURA DO SOLO

A textura e a estrutura do solo são características que influenciam expressivamente a movimentação da água no solo. Tais características determinam a quantidade de macroporos presente em seu perfil, os quais são de extrema importância na condutividade hidráulica do solo. (FIORIN, 2008). Textura é um termo empregado para designar a proporção relativa das frações argila, silte e areia no solo.

Observa-se ainda que a composição do solo pode influenciar diretamente sua taxa de infiltração e capacidade de retenção de água. Segundo Azevedo et al. (2007), em solos arenosos ocorre infiltração mais rápida e há pouca retenção da água devido ao espaço poroso, visto que há predomínio de macroporos, que permitem a drenagem livre da água do solo. Esses são solos que retêm pouca água. Em contraste, nos solos argilosos, geralmente a infiltração é mais lenta e existe maior retenção de água no solo, devido à presença dos microporos que retêm a água contra as forças da gravidade. Esta característica reduz o espaço poroso e limita o movimento do ar e da água no solo.

A textura é, geralmente, determinada em laboratório. Contudo, também pode ser avaliada diretamente no campo, como é o caso das descrições de perfis de solos. Esta avaliação no campo deve ser seguida da determinação em laboratório, que é mais precisa (EMBRAPA, 1997).

A análise textural pode ser efetuada pelo método do Densímetro, conhecido também como método do hidrômetro, proposto em 1926 por Bouyoucos. Este método baseia-se no princípio de que a matéria em suspensão (silte e argila) confere determinada densidade ao líquido. Com a ajuda de um

densímetro, Bouyoucos relacionou as densidades com o tempo de leitura e com a temperatura, calculando com esses dados a porcentagem das partículas.

O triângulo de classificação textural de solos (Figura 1), apresentado por Lemos e Santos (1996), permite classificar o solo com base no seu conteúdo de argila, silte e areia. Esta informação revela-se imprescindível para o estudo da faixa de água disponível dos solos.

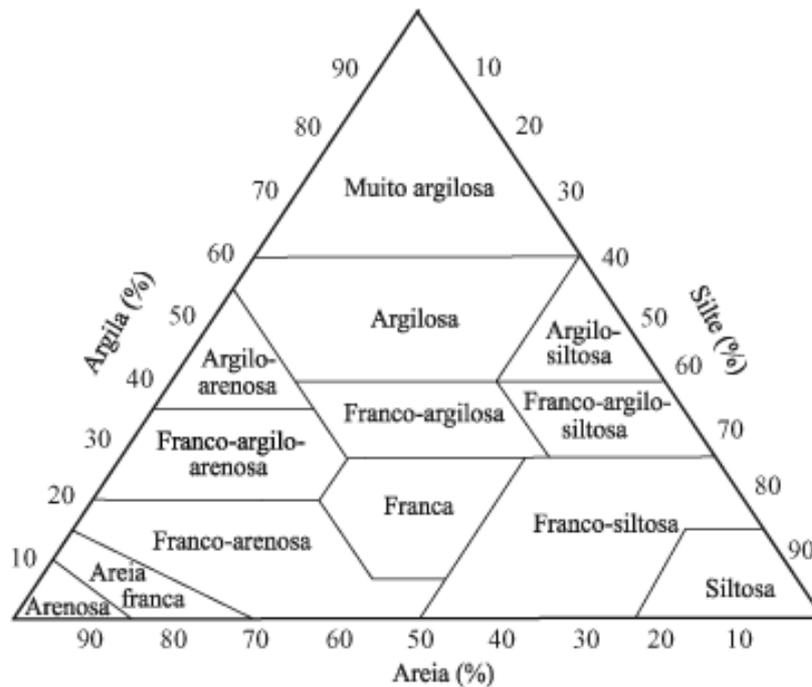


Figura 1 – Triângulo de classificação textural de solos.

Fonte: Manual de descrição e coleta de solos no campo (LEMOS & SANTOS, 1996).

2.3 – DENSIDADE DO SOLO

Descrita como uma variável que pode expressar o índice de compactação do solo, a densidade do solo é comumente utilizada nas avaliações do estado estrutural dos solos (MICHELON, 2010).

A densidade do solo é definida pela razão entre a massa de solo seco e o volume do solo. Este conceito está relacionado com a porosidade do solo, ou

seja, a redução do espaço poroso tem como consequência o aumento da densidade do solo (REICHERT et al. 2003).

Segundo Reichardt & Timm (2004), solos minerais geralmente apresentam valores de densidade entre $1,0 \text{ Mg m}^{-3}$ e $2,0 \text{ Mg m}^{-3}$. Ainda segundo os mesmos autores, solos de composição mais arenosa apresentam-se com densidade superior a $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$, enquanto que os materiais mais argilosos são frequentemente menos densos.

2.4 – ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO

Ao estudar a relação entre as características físicas do solo e a quantidade de água que o mesmo é capaz de armazenar, Kramer & Boyer (1995) propuseram uma curva característica de água disponível no solo, baseada, principalmente, na classe textural. Segundo seu estudo, solos com elevado teor de argila (muito argilosos) apresentam conteúdo de água na faixa de $0,3 \text{ cm cm}^{-1}$ a $0,4 \text{ cm cm}^{-1}$. Os mesmos autores observaram que a faixa de água disponível tende a ser mais ampla para solos intermediários entre argila e areia, porém ainda com elevado teor de argila, variando de $0,2 \text{ cm cm}^{-1}$ a $0,4 \text{ cm cm}^{-1}$. Constataram ainda que, quanto maior a porcentagem de areia no solo, menor será a quantidade e a amplitude dos valores de água disponível. Nesse sentido, os autores observaram valores de $0,02 \text{ cm cm}^{-1}$ a $0,06 \text{ cm cm}^{-1}$ de conteúdo de água em solos muito arenosos.

Ao determinar a curva de retenção de água para um solo composto por $756,8 \text{ g kg}^{-1}$ de argila, $120,6 \text{ g kg}^{-1}$ de silte e $122,6 \text{ g kg}^{-1}$ de areia, Trintinalha (2000) obteve uma curva de retenção de água que apresentou o valor de $0,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ corresponde ao potencial matricial, da ordem de $-6,0 \text{ kPa}$, o qual foi tomado como sendo correspondente à capacidade de campo (cc). Admitiu-se como unidade correspondente ao ponto de murcha (pmp) o valor de $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, que corresponde ao potencial de -1500 kPa . Assim, a água disponível (AD) neste solo é da ordem de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o que corresponde a $1,0 \text{ mm}$ de água por

centímetro de profundidade de solo. Resultados estes que corroboram as observações de Kramer & Boyer (1995).

O solo utilizado no trabalho de Trintinalha (2000), frequentemente encontrado na região noroeste do Estado do Paraná, apresenta grande semelhança textural com aquele encontrado na posição inferior da topossequência adotada neste trabalho (conteúdo de argila na ordem de 70%), além do fato de ambos os solos serem originários da mesma região. Isso permite aceitar que, para o presente estudo, em especial para a posição inferior na topossequência, seria razoável assumir a mesma curva característica de retenção de água no solo, apresentada por este autor. De acordo com esta curva, a umidade do solo na capacidade de campo é da ordem de $0,44 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ e no ponto de murcha é da ordem de $0,34 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. A umidade do solo na saturação tem valor médio da ordem de $0,58 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$.

Adiciona-se às observações supracitadas o fato de que, ao se estudar a variação da AD em relação à textura do solo, observa-se que, a posição inferior da topossequência apresenta condição intermediária de AD, uma vez que esta assumirá valores maiores para a textura intermediária e menores para textura arenosa, conforme observado por Kramer & Boyer (1995). Assim, revela-se a faixa de valores de umidade do solo de maior importância para os objetivos agronômicos.

2.5 – REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO - TDR

A Reflectometria no Domínio do Tempo (*Time Domain Reflectometry* - TDR) mede a constante dielétrica aparente do solo (K_a), a partir da medida do tempo de viagem de um pulso eletromagnético, em uma sonda metálica de um certo comprimento, cravada no solo, na profundidade desejada. A constante K medida neste sistema (ar-solo-água) é denominada constante dielétrica aparente (K_a [adimensional]). Conhecendo-se esta variável, pode-se estimar a umidade volumétrica do solo fazendo-se o uso de curvas de calibração ou modelos

ajustados obtidos a partir de dados de campo ou de laboratório (SOUZA et al. 2002).

Fellner-Feldegg (1969) desenvolveu a técnica da TDR ao relacionar a velocidade de propagação de um pulso de voltagem com a constante dielétrica do meio onde esse pulso se propaga. Segundo o mesmo autor, o cálculo da constante dielétrica (K_a) é realizado a partir do tempo que pulsos eletromagnéticos levam para percorrer as hastes metálicas da sonda introduzidas no solo, as quais funcionam como guias de onda.

Estudos preliminares mostraram que a constante dielétrica do solo estava intimamente relacionada com a umidade do solo, sendo pouco dependente da textura e estrutura deste (DAVIS & ANNAN, 1977). Da mesma forma, Topp et al. (1980) mostram que a constante dielétrica dos solos é fortemente afetada pelo seu conteúdo de água, sendo praticamente independente de outras variáveis. No entanto, desde a década de 90, diversos trabalhos têm apresentado resultados que demonstram a influência das características do meio sobre as leituras da TDR, interferindo na precisão de suas leituras. Para esses pesquisadores, a relação única entre umidade e constante dielétrica não pode ser aceita (SILVA, 1998; SOUZA et.al., 2000; TOMMASELLI & BACHI, 2001; TRINTINALHA, 2000).

A velocidade de propagação do pulso eletromagnético é fortemente influenciada pelo conteúdo de água do solo, decorrente da forte diferença entre as constantes dielétricas da água e dos elementos constituintes da matriz do solo (TRINTINALHA, 2005). Ainda segundo Trintinalha (2005), o solo é um material dielétrico, o qual apresenta um valor de constante dielétrica (K), constituído de três componentes: as partículas sólidas ($K = 3$ a 5), o ar dos poros ($K = 1$) e o conteúdo de água ($K = 81$). Portanto, a velocidade do pulso aplicado será função de uma proporção entre três constituintes e, neste caso, define-se uma única constante dielétrica aparente $K_a = (c/v)$ onde “ c ” é a velocidade da luz ($3,0 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$) e “ v ” é a velocidade do pulso eletromagnético. Porém, a reflectometria de micro-ondas é efetuada no domínio temporal, ou seja, mede-se apenas o tempo “ t ” de tráfego do pulso ao longo das hastes de metal de

comprimento “L” inseridas no solo. Assim, a constante dielétrica pode ser calculada por meio da Equação 1:

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

em que,

K_a = constante dielétrica aparente (adimensional);

t = Tempo de deslocamento (ns);

c = Velocidade da luz (30 cmns^{-1});

L = Comprimento da haste (cm).

O pulso elétrico é estabelecido por um equipamento especial e conduzido até a sonda por meio de um cabo coaxial.

As sondas se apresentam de forma variada e podem ser instaladas tanto no sentido horizontal como no vertical (TRINTINALHA et al., 2004), desde que se padronize o tipo de sonda e a posição de instalação. Contudo, Teixeira et al. (2003) afirmam que, no processo de calibração, não há diferença no ângulo de inserção da sonda de TDR no solo.

Existem diversos tipos de sondas disponíveis no mercado, as quais podem ter variado número de hastes, bem como diferentes comprimentos de haste. Há ainda a possibilidade de se construir as sondas de TDR, observando determinados critérios para garantir que suas leituras sejam confiáveis. Souza et al. (2006b) enfatizam que a construção de sondas objetiva reduzir o custo desta técnica, viabilizando sua utilização nas mais diversas condições, principalmente, em situações que necessitam de quantidade elevada de sondas de TDR. Sondas manufaturadas se apresentam como uma alternativa às comerciais e podem substituir com eficiência as mesmas.

Para Serrarens et al. (2000), citado por Trintinalha et al. (2001), a precisão das medidas feitas por meio da técnica da TDR é em grande parte controlada pela instalação da sonda e especificamente influenciada pelo grau de contato físico entre sondas de TDR e o solo circunvizinho, bem como pela compactação do solo. Trintinalha et al. (2001) avaliaram a influência da instalação das sondas e de características de cada sonda, sobre as curvas de calibração de um equipamento TDR em um NITOSSOLO VERMELHO Distroférico, da região Noroeste do Estado do Paraná. Segundo os mesmos autores, as diferenças entre sondas não influenciaram na calibração para este solo. Por outro lado, o contato solo - sonda, que varia conforme a instalação, pode influenciar na medida de umidade realizada com o uso desta técnica. Fica, portanto, evidente a importância de se padronizar a instalação das sondas com o objetivo de se evitar erros de leitura, buscando assim a obtenção de estimativas de umidade mais precisas.

Por sua vez, Sant'ana et al. (2012) trabalharam com o desempenho de sondas de TDR manufaturadas de diferentes comprimentos de haste. Os pesquisadores relatam em seu estudo que sondas de diferentes comprimentos de haste estimaram de forma diferente a umidade do solo. Concluindo, portanto, que o comprimento de hastes de sondas de TDR tem efeito na constante dielétrica e na estimativa da umidade volumétrica do solo.

Diversos tipos de equipamentos geradores de pulso e sondas vêm sendo desenvolvidos e testados nos últimos anos. Isso colabora com a disseminação e popularização do método, além de reduzir o custo dos aparelhos e seus acessórios. Aparelhos de TDR costumavam ser volumosos e pesados, o que dificultava seu manuseio e transporte no campo. Aparelhos modernos se apresentam leves e portáteis, incorporando tecnologia com o objetivo de tornar mais prático seu uso.

Em comparação com os métodos tradicionais de determinação da umidade do solo, a técnica da TDR apresenta vantagens por ser um método não destrutivo, não usar radiação e ser de fácil movimentação. Além disso, permite a

leitura em tempo real, podendo, em determinados casos, surtir efeito imediato na quantidade de água a ser aplicada.

Tommaselli & Bacchi (2001) afirmam que a reflectometria de micro-ondas é uma alternativa para a medida do conteúdo de água do solo e com a popularização e a queda dos preços dos computadores e dispositivos eletrônicos, a técnica apresenta-se com grande potencial para aplicação em monitoramento simultâneo da umidade do solo em múltiplos pontos de estudo.

Outra grande vantagem do método é o número de leituras, que, devido sua praticidade, pode ser ampliado para melhor representar as condições do campo. A possibilidade de automação e de acoplamento a dispositivos multiplicadores de leituras são justificativas fortes para a adoção cada vez maior da técnica em substituição a outros métodos (TOPP et al., 1980; COELHO & OR, 1996, citados por SOUZA et al. 2006a). Herrmann Jr. (2001) destaca que uma das vantagens da TDR é sua versatilidade, uma vez que possibilita a obtenção de valores de umidade do solo e da condutividade elétrica simultaneamente.

Coelho et al. (2001) e Santos et al. (2010) atestam que a calibração da TDR pode ser realizada tanto em amostras de solo deformadas, quanto em não deformadas. Para esses autores, o tipo da amostra de solo não interfere nos valores do conteúdo volumétrico de água para um mesmo valor da constante dielétrica do solo.

O uso adequado da técnica de TDR pode fornecer subsídios para o manejo da irrigação com qualidade, contribuir para a tomada de decisão do momento de irrigar e da quantidade de água a ser aplicada, com mais critério (TRINTINALHA, 2005). O uso da técnica permite o cálculo da lâmina a ser aplicada em tempo real, não precisando recorrer a curvas de retenção em que as amostras muitas vezes foram retiradas de locais distantes do sensor (CARROW, 1995; YOUNG et al., 1997; COELHO & ARRUDA, 2001). Quando comparada com o método gravimétrico e com a sonda de nêutrons, a técnica da TDR tem a vantagem de ser não destrutiva e de não usar radioatividade, respectivamente.

Dentro do princípio de funcionamento do aparelho, a calibração do mesmo deveria ser universal, ou seja, independente das características do meio poroso (TOPP et al., 1980). Embora esta calibração universal seja empregada em alguns modelos de equipamento disponíveis comercialmente, diversos autores ressaltam que a composição granulométrica do solo e a própria instalação da sonda podem influenciar na leitura da constante dielétrica relativa para diferentes tipos de solo, na mesma umidade, conforme observam Newton (1977), Wang (1980), Robinson et al. (1994), Tommaselli (1997) e Trintinalha (2000). Segundo Skierucha (2000), erros de medição de umidade do solo pela TDR estão relacionados a três aspectos: erro de calibração; instalação de sondas; e erro de leitura do tempo causado pelo próprio sistema eletrônico do dispositivo. Já Souza et al. (2006a), antecipam possíveis problemas de campo que podem ser encontrados ao se fazer uso desta técnica, como a calibração inadequada, a instalação de sondas e erros na interpretação gráfica da impedância do meio, sendo esse último de importância na estimativa da concentração da solução no solo.

Tommaselli & Bacchi (1995), citados por Trintinalha (2005), mostraram que a curva de calibração do TDR não se ajustou aos dados medidos em dois solos, tornando necessária a calibração local para cada solo. Villwock et al. (2004) advertem que a calibração da técnica da TDR é exigida, em especial, quando se trabalha com LATOSSOLOS e suas particularidades, tais como o alto teor de ferro (da ordem de 70 mgdm^{-3}), alto teor de argila (acima de 60%) e expansibilidade.

Gonçalves et al. (2011) procuraram avaliar o efeito da densidade do solo (D_s) sobre a curva de calibração da TDR, em um NITOSSOLO VERMELHO Distroférrico, com elevado conteúdo de argila. Os autores identificaram forte efeito da D_s sobre as curvas de calibração e incorporaram esta variável aos coeficientes do modelo ajustado para calibração, melhorando a qualidade do ajuste em relação a um modelo polinomial de θ como função apenas de K_a .

Diversos trabalhos têm mostrado que o modelo polinomial de terceiro grau tende a descrever a curva de calibração experimental da TDR. Coelho et al.

(2006) evidenciam que os modelos de calibração variam conforme o solo e que um modelo polinomial de terceira ordem pode ser calibrado com exatidão para cada solo. Este modelo pode ser expresso pela Equação 2:

$$k = a + b\theta + c\theta^2 + d\theta^3 \quad (2)$$

em que,

θ = conteúdo de água do solo com base em volume, $m^3 m^{-3}$;

a, b e c = coeficientes a serem determinados via calibração local;

k = constante dielétrica do meio.

Segundo Trintinalha (2005), para se obter um modelo que melhor se ajuste as condições gerais de solo deve-se transformar os coeficientes do modelo polinomial de terceiro grau em outros modelos, lineares, que levem em conta o efeito das variáveis que possam estar influenciando as leituras da constante dielétrica, tais como aquelas relacionadas com a textura e a estrutura do solo. Um exemplo deste procedimento pode ser encontrado em Trintinalha (2000) que inseriu a densidade do solo nos coeficientes do modelo, obtendo, assim, um melhor ajuste, o que resultou em estimativas mais próximas da real condição de umidade do solo.

Tradicionalmente, trabalhos conduzidos com a TDR são avaliados por meio de indicadores de qualidade de ajuste. Tais indicadores são, normalmente, baseados apenas na significância estatística dos coeficientes dos termos dos modelos ajustados aos valores medidos. Além disto, consideram o valor do coeficiente de determinação (R^2), decorrente do ajuste estatístico do modelo, como uma expressão da qualidade do mesmo, no que se refere à sua precisão (HASHIGUTI et al., 2011).

Em trabalhos mais recentes, 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 índice “d” com o coeficiente de correlação “r”, tem sido empregado como indicador adicional da precisão e da exatidão das estimativas.

A precisão refere-se à distância relativa entre as medidas apuradas de uma sequência de amostras. Quanto maior a distância (maior desvio padrão) menor a precisão. A exatidão, por outro lado, refere-se à distância entre a medida apurada e um valor de referência ou verdadeiro. Quanto mais próximo do valor de referência estiver uma medida, maior sua exatidão.

O índice de desempenho foi utilizado por vários autores em diversas áreas, para avaliar o desempenho de modelos matemáticos, como se observa nos trabalhos de Costa et al. (2008), Cecílio & Santos (2009), Castro et al. (2010), Tavares et al. (2008) e Hashiguti et al. (2011) e Hashiguti (2013). O emprego destes índices em trabalhos conduzidos com a TDR tem permitido selecionar os modelos matemáticos que se mostram mais adequados. No entanto, a estimativa de umidade feita com a TDR pode conter erros consideráveis em relação aos valores de umidade do solo medidos, em especial, à faixa de água disponível (AD) para as plantas no solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no Departamento de Agronomia, da Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá-PR. O município de Maringá encontra-se localizado na latitude de 23°25' Sul e longitude de 51°57' Oeste e apresenta altitude média de 540 metros. O clima da região, segundo classificação de Köppen, é caracterizado como Cfa, mesotérmico úmido com chuvas abundantes no verão e inverno seco, com precipitação média anual de 1500 mm. A temperatura média anual é de 21 a 23°C, sendo Junho, Julho e Agosto os meses mais frios, com temperaturas médias de 16 a 17°C. Os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro são os meses mais quentes, com temperaturas médias de 27 a 28°C (IAPAR, 2012).

O solo foi coletado em uma propriedade rural do município. O local de amostragem tem coordenadas: latitude 23°14' Sul e longitude de 51°46' Oeste. Foram definidas três posições ao longo de uma transeção, definida na direção da maior declividade do terreno: no topo da encosta, no fundo do vale e em uma posição intermediária, de forma a se ter o conteúdo de argila variável entre amostras. Em cada posição foi coletada uma amostra de aproximadamente 60 kg de solo, na profundidade de 0 a 20 cm. O solo da propriedade foi classificado como NITOSSOLO VERMELHO Distroférico (EMBRAPA, 2006). O material obtido em cada ponto na topossequência foi seco ao ar, sendo posteriormente triturado e peneirado na peneira de 2 mm, constituindo terra fina seca ao ar (TFSA).

Amostras do solo foram encaminhadas ao laboratório para determinação do conteúdo de areia, silte e argila pelo método do densímetro. O densímetro mede a densidade da suspensão, sendo necessário verificar sua correspondência com o densímetro de Bouyoucos, calibrado em g de solo/L de suspensão. Como o densímetro de Bouyoucos é calibrado para a temperatura de 68°F (20°C), as leituras deverão ser corrigidas conforme a temperatura. Assim, para cada grau acima ou abaixo de 20°C, deve-se acrescentar ou subtrair 0,36 graduações da

leitura do densímetro, respectivamente (EMBRAPA, 1997). Posteriormente o solo foi classificado utilizando-se o triângulo de classificação textural de solos apresentado por Lemos & Santos (1996).

Após a fase de preparação do material, foram preenchidos com TFSA, para cada ponto, oito recipientes plásticos de aproximadamente 25 cm de altura por 10 cm de diâmetro (2000 cm³ de volume, aproximadamente), com paredes perfuradas. A massa de TFSA colocada em cada recipiente variou, uma vez que diferentes densidades de solo foram impostas por meio de diferentes níveis de compactação, seguindo-se a metodologia descrita por Trintinalha (2000) e Gonçalves et al. (2011). Todos os recipientes tiveram uma sonda de 20 cm de comprimento introduzida no seu interior, na posição vertical, a partir da superfície. Os recipientes foram então colocados para saturar seguindo o procedimento padrão para saturação de amostras de solo utilizado no Laboratório de física do solo. Para isto, os recipientes foram colocados em bandeja contendo água de forma a que o nível desta atingisse cerca de dois terços da altura dos mesmos.

Após a saturação, os recipientes foram expostos ao ambiente do interior do laboratório. A secagem do solo ocorreu de maneira relativamente uniforme no perfil, uma vez que as paredes destes recipientes eram perfuradas.

Diariamente foram feitas entre duas e três leituras da constante dielétrica (K_a) em cada recipiente. Também foi feita a leitura da umidade com base em massa (u), obtida por meio de uma balança de precisão, pelo método gravimétrico. A partir do valor de u e do valor da densidade do material em cada recipiente, obteve-se a umidade com base em volume (θ) correspondente.

A unidade TDR utilizada foi o modelo TRASE 6050X1, produzido pela *Soilmoisture Equipment Corp.* Embora este equipamento já esteja no mercado há mais de 15 anos e apresente um custo bem acima do padrão dos aparelhos de TDR hoje disponíveis, o mesmo não se apresenta ultrapassado, sendo, inclusive, muito apropriado para a pesquisa científica, devido as suas características. Além do que, destacam Hanek et al. (2001), este dispositivo possibilita a leitura direta de valores de umidade volumétrica do solo, desde que devidamente calibrado.

Foram utilizados quatro modelos matemáticos para a calibração da TDR. Para todos os modelos, θ foi expresso em m^3m^{-3} . Para facilitar sua abordagem, os modelos foram denominados M1, M2, M3 e M4, sendo estes:

M1 - Modelo proposto por Topp et al. (1980), em função de sua importância e de seu generalizado emprego. Este modelo foi utilizado para se estimar a umidade do solo em função de K_a (adimensional), para as condições experimentais descritas. O modelo apresenta coeficientes numéricos preestabelecidos e foi proposto com a premissa de ser válido para qualquer condição, sendo desnecessária a calibração local, como inicialmente suposto, e é representado pela Equação 3:

$$\theta = [-530 + 292K_a - 5,5K_a^2 + 0,043K_a^3]10^{-4} \quad (3)$$

M2 - Modelo polinomial de terceiro grau, que também foi utilizado para se estimar a umidade do solo em função de K_a (adimensional), ajustado ao conjunto de todos os dados observados e aos dados de cada posição, separadamente, na topossequência por meio de coeficientes numéricos (b). Esse modelo é representado pela Equação 4:

$$\theta = b_0 + b_1K_a + b_2K_a^2 + b_3K_a^3 \quad (4)$$

M3 - Modelo construído com base no trabalho de Gonçalves et al. (2011), incorporando os valores da densidade do solo (D_s), expressa em Mgm^{-3} , ajustado ao conjunto de todos os dados observados e aos dados de cada posição, separadamente, na topossequência, por meio de coeficientes numéricos (b). Esse modelo é representado pela Equação 5:

$$\theta = b_0 + b_1D_s + b_2K_a + b_3K_aD_s + b_4K_a^2 + b_5D_sK_a^2 \quad (5)$$

M4 - Modelo completo, construído de modo a englobar as variáveis densidade do solo (Ds) e conteúdo de argila do solo (Argila), expressa em gKg^{-1} , ajustado ao conjunto de todos os dados observados (todas as posições na topossequência) por meio de coeficientes numéricos (b). Esse modelo é representado pela Equação 6:

$$\theta = b_0 + b_1Ds + b_2\text{Argila} + b_3\text{KaDs} + b_4\text{KaArgila} + b_5\text{DsArgila} + b_6\text{Ka}^2 + b_7\text{Ka}^2\text{Ds} + b_8\text{Ka}^2\text{Argila} \quad (6)$$

Aos valores obtidos de umidade volumétrica e correspondente valor da constante dielétrica para o conjunto de dados referente às três posições na topossequência, foram ajustados os modelos empíricos de calibração (M2, M3 e M4), por meio de análise de regressão *backwise*, no *software* SISVAR (FERREIRA, 2011). Adicionalmente, os modelos M2 e M3 foram ajustados aos dados experimentais, para cada uma das três posições estudadas.

A qualidade do ajuste dos modelos foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2), bem como por meio da metodologia apresentada por Willmott (1981), complementada por Camargo & Sentelhas (1997).

Para avaliar o desempenho dos diferentes modelos matemáticos estudados nesse trabalho, foi aplicado o índice estatístico “c”, denominado índice de desempenho, que mostra o desempenho de um modelo em relação a valores padrão, a partir das indicações de dois coeficientes, calculado segundo a expressão: $c = rd$, na qual “r” é o coeficiente de correlação linear de Pearson, o qual está relacionado com a precisão do modelo. O índice “d” é o coeficiente de concordância (WILLMOTT, 1981), conforme Equação 7, e expressa a 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.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (7)$$

em que,

P_i = valor estimado;

O_i = valor observado;

O = média dos valores observados.

Os critérios empregados para a avaliação do ajuste dos modelos são mostrados na Tabela 1, a partir da apresentação dos mesmos feita por Camargo & Sentelhas (1997).

Tabela 1 – Critérios para análise de desempenho de modelos por meio do índice “c”

Desempenho:	Ótimo	Muito bom	Bom	Mediano	Ruim	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

Adicionalmente foi feita a análise de resíduos dos modelos, na qual buscou-se estudar a distribuição estatística dos valores dos resíduos obtidos por meio da diferença entre os valores de θ observados (θ_O) e estimados (θ_E) pelos modelos em estudo. Esta análise de resíduos foi utilizada, em conjunto com os demais recursos, para se avaliar a qualidade do modelo ajustado a cada conjunto de dados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores do conteúdo de areia, silte e argila do solo, para cada posição da encosta, adotadas no presente trabalho, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Conteúdo de Areia, Silte e de argila do solo, nas posições selecionadas na topossequência

Posição da Amostra	Areia gKg ⁻¹	Silte gKg ⁻¹	Argila gKg ⁻¹
Inferior	210	90	700
Intermediária	480	40	480
Superior	850	10	140

Pode-se verificar que a variação dos valores das frações granulométricas ao longo da encosta foi expressiva. A observação do triângulo de classificação textural de solos (Figura 1), apresentado por Lemos & Santos (1996), revela que as diferentes posições amostradas ao longo da topossequência apresentaram textura variando de franco-arenosa a muito argilosa, entre o topo e a base desta encosta, respectivamente. Na posição intermediária, observam-se quantidades iguais de areia e argila, o que estabelece uma classificação granulométrica intermediária (argilo-arenosa).

Variações de mesma magnitude no conteúdo de argila foram encontradas por Reis et al. (2007) ao analisar a composição granulométrica e orgânica do solo de amostras provenientes de uma topossequência. Contudo, os autores constataram uma diminuição significativa do teor de argila entre as posições estudadas no sentido topo para base.

Na Tabela 3 é apresentada a análise estatística descritiva dos valores de umidade volumétrica, Ka e Ds, obtidos durante o processo de secagem do

material oriundo das três posições adotadas. Verifica-se que uma ampla faixa de valores de umidade foi obtida, abrangendo valores próximos da saturação e valores abaixo do correspondente ao ponto de murcha permanente, usuais para solos argilosos da região. Estes valores confirmam que o estudo foi conduzido durante um processo de secagem do solo, no qual a faixa de água disponível (AD) está contida dentro da faixa de valores de umidade avaliada, para as três posições na topossequência. .

Tabela 3 – Estatística descritiva dos valores de umidade do solo (θ), expressa em m^3m^{-3} , constante dielétrica (Ka), e Densidade do solo (Ds), expressa em Mgm^{-3} , para as posições em estudo

Variável	Posição na topossequência											
	Inferior (70% Argila)				Intermediário (48% Argila)				Superior (14% Argila)			
	Média	Min	Max	CV%	Média	Min	Max	CV%	Média	Min	Max	CV%
θ	0,35	0,22	0,58	27,4	0,30	0,17	0,54	32,6	0,23	0,10	0,45	42,4
Ka	24,3	11,7	38,2	34,0	19,7	9,7	33,5	36,9	14,2	6,8	24,3	35,5
Ds	1,28	1,08	1,44	10,1	1,29	1,09	1,52	10,1	1,51	1,39	1,69	6,8

Pode-se verificar que os valores médios de umidade do solo crescem em direção à base da encosta, com os maiores valores obtidos na posição inferior. Em sentido inverso tem-se o crescimento dos valores do coeficiente de variação da umidade, ou seja, o maior valor foi obtido no topo da encosta. Observa-se que os valores de umidade obtidos na posição inferior apresentaram CV de apenas 27%, enquanto aqueles obtidos no topo da encosta apresentaram CV de 42%, evidenciando que a redução do valor médio esteve associado a uma ampliação da dispersão em torno do mesmo. Por outro lado, os valores médios de Ka, os quais apresentaram uma redução com a mesma tendência de redução dos valores

médios de umidade, ou seja, da base para o topo da encosta, apresentaram CV semelhantes, revelando que a dispersão em torno da media não sofreu modificações, entre as posições na encosta.

Os valores médios e o coeficiente de variação de Ds apresentam pouca variação entre as posições inferior e intermediária. Porém, na posição superior, o valor médio de Ds aumenta, o que é compatível com o aumento do teor de areia, enquanto o CV diminui.

Os modelos empíricos selecionados, no presente trabalho, para descrever a relação entre umidade do solo e correspondente constante dielétrica foram ajustados ao conjunto de dados obtidos para as três posições na topossequência. Os modelos M2 e M3, particularmente, foram ajustados para cada posição da topossequência, individualmente. Utilizou-se para isto o programa computacional SISVAR, empregando-se um nível de significância da ordem de 5% ($p < 0,05$). Os resultados, para o modelo M2, estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes do modelo M2 (representado pela Equação 4) para o conjunto de dados e para cada série de dados referente às posições estudadas

Posições na topossequência	Coeficientes				R ²
	b_0	b_1	$b_2 (10^{-3})$	$b_3 (10^{-5})$	
Conjunto	-0,095*	0,033*	-0,857*	1,109*	0,941
Inferior	-0,194*	0,056*	-2,253*	3,468*	0,963
Intermediária	0,144*	n.s.	0,475*	-0,454*	0,971
Superior	0,075*	n.s.	0,755*	-0,527*	0,974

* - Significativo ao nível de 5%.

Pode-se observar, na Tabela 4, que todos os coeficientes foram significativos para o modelo ajustado aos dados em conjunto, ou seja, para os dados oriundos das três posições na topossequência. Neste caso, o R² foi inferior

aos demais, evidenciando a maior dispersão dos dados em conjunto. Para cada série de dados, obteve-se R^2 entre 0,96 e 0,97 o que, supostamente, sinaliza para uma qualidade adequada dos ajustes realizados. Uma análise baseada apenas neste critério sinaliza que o ganho de qualidade decorrente do ajuste de um modelo para cada série de dados promove um incremento de qualidade pouco expressivo em relação à adoção de um modelo geral.

O ajuste feito para o modelo M3, o qual incorpora o efeito da densidade do solo nos seus coeficientes, também considerou o conjunto de dados e cada série individualmente. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficientes do modelo M3 (representado pela Equação 5) para o conjunto de dados e para cada série de dados referente às posições estudadas

Posições na topossequência	Coeficientes						R^2
	b_0	b_1	$b_2 (10^{-2})$	$b_3 (10^{-2})$	$b_4 (10^{-3})$	$b_5 (10^{-3})$	
Conjunto	0,472*	-0,358*	-3,183*	3,842*	1,156*	-1,002*	0,953
Inferior	0,496*	-0,253*	-2,804*	2,416*	0,993*	-0,653*	0,974
Intermediária	0,134*	n.s.	0,784*	-0,394*	n.s.	0,208*	0,972
Superior	0,091*	-0,033*	n.s.	0,455*	1,063*	-0,453*	0,979

* - Significativo ao nível de 5%.

Pode-se observar na Tabela 5 que todos os coeficientes foram significativos para o modelo ajustado aos dados em conjunto, ou seja, para os dados oriundos das três posições na topossequência. Assim como para o modelo polinomial cúbico, apresentado na Tabela 4, o R^2 para o ajuste aos dados em conjunto foi inferior aos demais, evidenciando a maior dispersão dos dados em conjunto. Para cada série de dados, obteve-se R^2 entre 0,97 e 0,98 o que, supostamente, sinaliza para uma qualidade adequada dos ajustes realizados. A comparação com os valores apresentados na Tabela 4 revela também que este modelo deu origem a valores de R^2 superiores, revelando que a incorporação da

densidade nos coeficientes produziu um incremento de qualidade em geral. Novamente, entretanto, a adoção de um modelo específico para cada série de dados não evidenciou incremento expressivo de qualidade, em relação à adoção de um modelo geral, com base na análise dos valores de R^2 .

O ajuste feito para o modelo M4 empregado neste trabalho, o qual incorpora o efeito da densidade do solo e do conteúdo de argila, considerou apenas o conjunto completo de dados, uma vez que o teor de argila é constante em cada série individualmente. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Coeficientes do modelo M4 (representado pela Equação 6) para o conjunto de dados referente às posições estudadas

Valores dos coeficientes ajustado ao conjunto de dados:			
b_0	0,731 (10^{-1})*	b_5	-1,071 (10^{-1})*
b_1	-0,989 (10^{-1})*	b_6	5,308 (10^{-4})*
b_2	4,955 (10^{-1})*	b_7	-3,609 (10^{-4})*
b_3	0,139 (10^{-1})*	b_8	2,152 (10^{-4})*
b_4	-0,254 (10^{-1})*	R^2	0,972

* - Significativo ao nível de 5%.

Verifica-se na Tabela 6 que todos os coeficientes foram significativos e que o R^2 referente a este ajuste superou o valor de 0,97, o que sinaliza para uma qualidade de ajuste equivalente à obtida pelos modelos M2 e M3 para cada série de dados individualmente, conforme Tabelas 4 e 5. Isto evidencia o expressivo efeito do conteúdo de argila do solo sobre a curva que relaciona umidade com constante dielétrica, corroborando a hipótese de que um modelo que incorpore o efeito da composição granulométrica do solo descreve de forma mais adequada esta relação.

O modelo M1 tem os seus coeficientes estabelecidos pelo autor (Topp et al., 1980), o qual sugere que seu emprego pode ser realizado em quaisquer circunstâncias. Uma avaliação visual da qualidade de ajuste deste modelo, em comparação com um modelo polinomial cúbico (M2), com coeficientes ajustados ao conjunto de dados (Tabela 4), pode ser realizada observando-se a Figura 2.

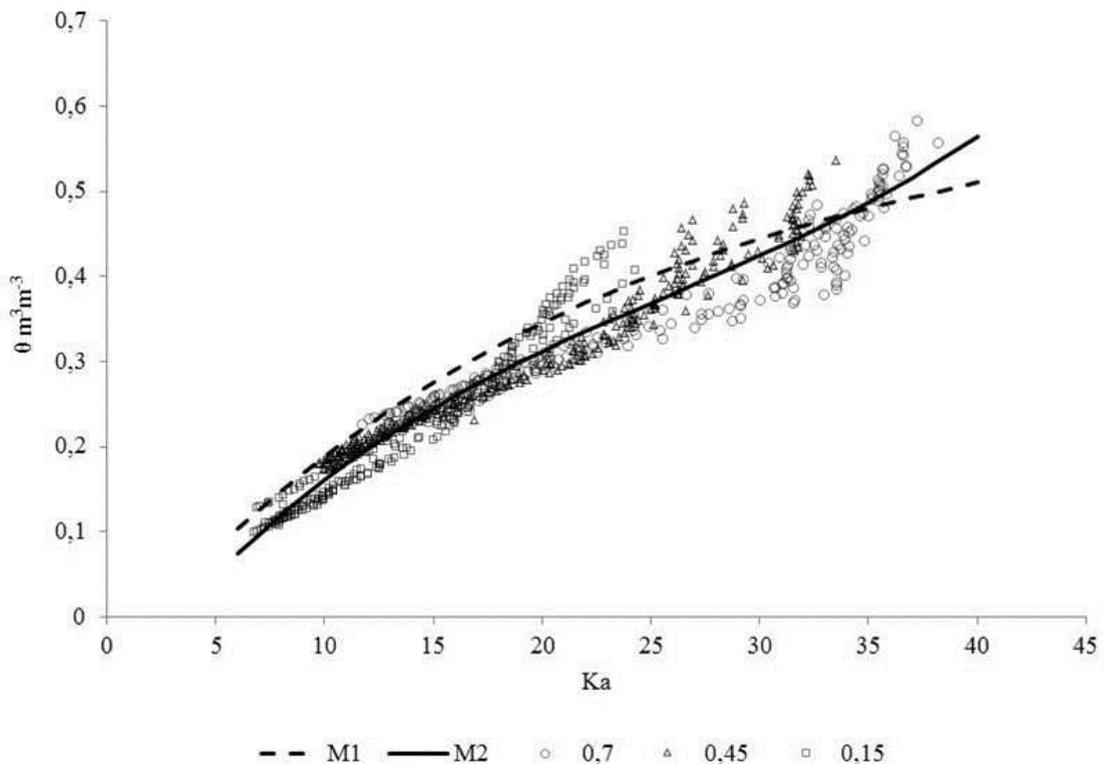


Figura 2 – Relação entre umidade do solo e respectiva constante dielétrica para o conjunto de dados experimentais e modelos M1 e M2.

Pode-se verificar na Figura 2 que a dispersão dos valores experimentais, em cada série, fica mais evidente na região correspondente à maior umidade do solo (acima de $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Também fica evidente que o distanciamento entre as séries é maior nesta região. Para as condições estudadas, a faixa de valores de umidade mais baixa (abaixo de $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) apresenta dispersão expressivamente

inferior, evidenciando que, nestas circunstâncias, a qualidade do ajuste de um modelo, mesmo que seja único para todo o conjunto de dados, pode ser adequada. Isto asseguraria a qualidade das estimativas de umidade feitas com a TDR, nestas circunstâncias.

Na região dos maiores valores de umidade, por outro lado, pode-se constatar, visualmente, que a dispersão dos valores em relação a um único modelo, qualquer que seja este, provavelmente acarretará erros de estimativa com valores demasiadamente elevados para serem aceitos em aplicações de pesquisa e até mesmo para aplicações práticas. Pode-se verificar que ambos modelos apresentados descrevem o conjunto de dados de forma a proporcionar erros de estimativa com uma distribuição visualmente semelhante. Com o propósito de se verificar qual modelo é mais adequado, outros indicadores de qualidade de ajuste devem ser empregados.

Pode-se constatar visualmente na Figura 2 que para um valor de K_a da ordem de 25, existem valores experimentais de umidade dispersos na faixa entre $0,45 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ e $0,30 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Ou seja, esta faixa é mais ampla que a faixa de água disponível ($AD = 0,1 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$), para os solos argilosos comumente encontrados na região. Portanto, a adoção de um modelo que gere um valor único de umidade, dentro desta faixa, terá associado a esta estimativa uma incerteza muito elevada, da ordem de, no mínimo, 50% de AD . Destaca-se que esta incerteza ocorre na faixa de valores de umidade de maior interesse agrônômico, por se tratar de água facilmente disponível para o processo de transpiração vegetal, assim como de valores na região logo acima da capacidade de campo, os quais estão relacionados com o processo de drenagem rápida do solo.

Os elevados valores de R^2 obtidos nos ajustes dos modelos descritos não expressam esta incerteza elevada das estimativas de umidade. Assim, outros indicadores de qualidade de ajuste, com referências em literatura, foram empregados para se avaliar a qualidade de ajuste. Na Tabela 7 são apresentados, para os modelos M1 e M2, os valores calculados do coeficiente de concordância “d” (WILLMOTT, 1981), que expressa uma medida de exatidão do modelo, o

coeficiente de correlação “r”, que expressa uma medida da precisão do modelo, e o índice de desempenho “c”, que expressa um desempenho conjunto do modelo.

Tabela 7 – Valores do coeficiente de concordância “d” (WILLMOTT, 1981), coeficiente de correlação “r” e do índice de desempenho “c” para os modelos M1 e M2, ajustados ao conjunto dos dados

Índices	Modelos	
	M1	M2
d	0,966	0,985
r	0,967	0,971
c	0,934	0,956

Observa-se, na Tabela 7, que ambos os modelos apresentaram índice de desempenho considerado ótimo ($c > 0,85$) para descrever a relação entre umidade e K_a , para o conjunto de dados referente a todas as posições estudadas. Contudo, o modelo M1 apresentou menor índice de desempenho ($c = 0,93$). O ajuste para as condições locais sugere um ligeiro acréscimo de qualidade da estimativa realizada.

Os gráficos obtidos pela comparação entre os valores de θ observados e aqueles estimados para o conjunto de dados, pelos modelos M1 e M2, são apresentados na Figura 3. A observação dos gráficos revela que a dispersão dos valores em torno do modelo linear ajustado é maior para o modelo M1.

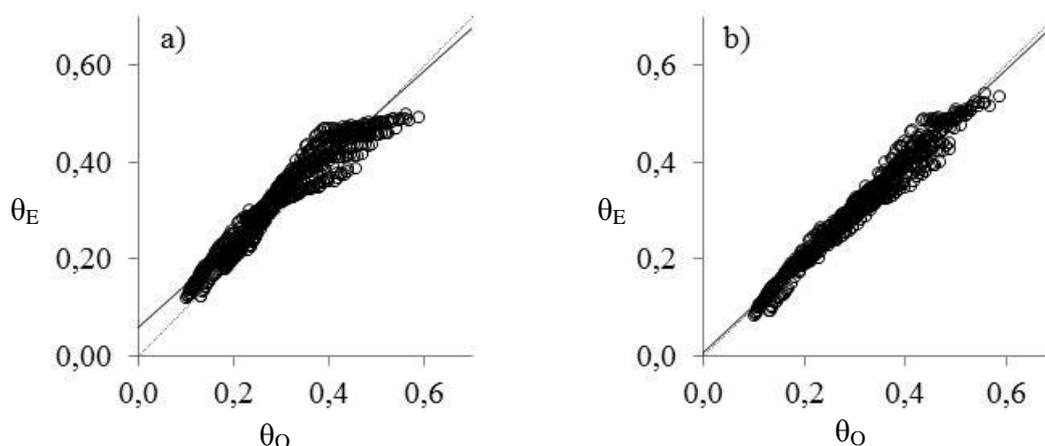


Figura 3 – Valores de θ observados (θ_O) e estimados (θ_E) pelos modelos a) M1 e b) M2 e modelo linear ajustado aos pares de valores referentes ao conjunto de dados.

Com o propósito de descrever a qualidade dos modelos em estudo, ajustados ao conjunto de dados das três posições, conforme Figura 3, são apresentados, na Tabela 8, os valores dos coeficientes angular e linear dos modelos lineares ajustados aos dados de resíduos, bem como o coeficiente de determinação (R^2) obtido via regressão linear.

Tabela 8 – Valores do coeficiente angular (a), linear (b) e de determinação (R^2) para os modelos M1 e M2, ajustados ao conjunto dos dados

Coeficientes	Modelos	
	M1	M2
a	0,885	0,942
b	0,060	0,017
R^2	0,935	0,943

A observação dos valores do coeficiente de determinação na Tabela 8 revela que os modelos praticamente não diferiram, apresentando R^2 de 0,94 para ambos. Contudo, o modelo M2 apresentou coeficiente angular mais próximo da

unidade ($a=0,942$), superior ao apresentado pelo modelo M1 ($a=0,885$). Observa-se ainda que o coeficiente linear do modelo M2 está mais próximo de zero ($b=0,017$) do que o apresentado pelo modelo M1 ($b=0,060$).

Os modelos M3, que incorpora a D_s , bem como o modelo M4, que incorpora D_s e conteúdo de argila, ajustados ao conjunto de valores experimentais, foram também avaliados por meio destes indicadores de qualidade. O resultado está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores do coeficiente de concordância “d” (WILLMOTT, 1981), coeficiente de correlação “r” e do índice de desempenho “c” para os modelos M3 e M4, ajustados ao conjunto dos dados

Índices	Modelos	
	M3	M4
d	0,988	0,993
r	0,977	0,987
c	0,965	0,980

Observa-se, na Tabela 9, que os modelos M3 e M4 apresentaram melhores índices de desempenho (0,965 e 0,980, respectivamente) que os apresentados pelos modelos M1 e M2 (0,934 e 0,956, respectivamente). O modelo M4 apresentou o melhor índice “c” dos modelos ajustados ao conjunto de dados referente a todas as posições estudadas. Essa observação revela indícios de que o ajuste dos modelos e a incorporação de variáveis relativas às características físicas do solo podem reduzir os erros de estimativa da umidade do solo.

Na Figura 4 são apresentados os gráficos obtidos pela comparação entre os valores de θ observados e aqueles estimados para o conjunto de dados, para os modelos M3 e M4.

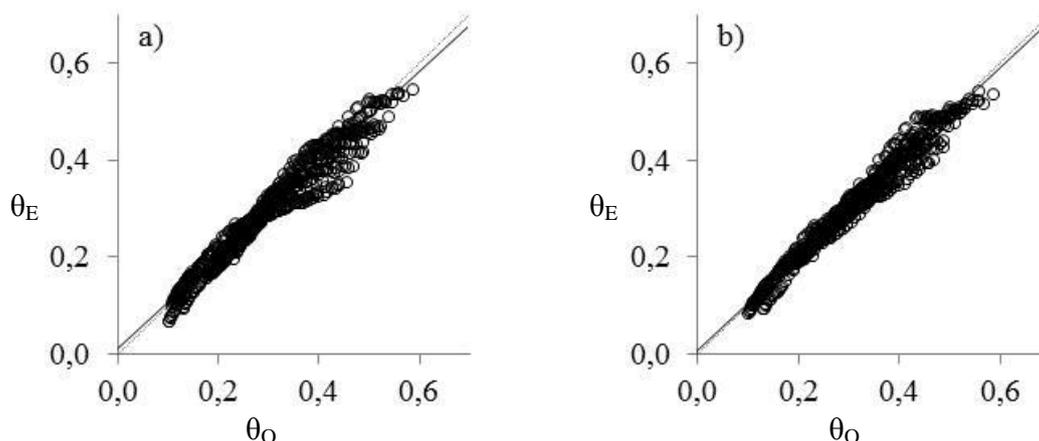


Figura 4 – Valores de θ observados (θ_O) e estimados (θ_E) pelos modelos a) M3 e b) M4 e modelo linear ajustado aos pares de valores referentes ao conjunto de dados.

A observação dos gráficos da Figura 4, em comparação com aqueles mostrados na Figura 3, revela que o modelo linear ajustado aos resíduos decorrentes do emprego do modelo M4 tem o coeficiente angular mais próximo da unidade ($a=0,973$) e o coeficiente linear mais próximo de zero ($b=0,008$), dentre os quatro modelos avaliados. Além disso, a dispersão dos valores em torno deste modelo é, visualmente, a menor, o que é corroborado pelos valores de R^2 apresentados nas Tabelas 8 e 10.

Tabela 10 – Valores do coeficiente angular (a), linear (b) e de determinação (R^2) para os modelos M3 e M4, ajustados ao conjunto de dados

Coeficientes	Modelos	
	M3	M4
a	0,953	0,973
b	0,014	0,008
R^2	0,954	0,974

De acordo com os valores apresentados na Tabela 10, a incorporação das variáveis físicas do solo deu origem aos maiores valores do coeficiente de determinação (0,95 e 0,97 para os modelos de M3 e M4, respectivamente). Observa-se também que o coeficiente angular está mais próximo da unidade (0,953 e 0,973 para os modelos M3 e M4, respectivamente) e o coeficiente linear próximo de zero (0,014 e 0,008 para os modelos de M3 e M4, respectivamente).

Os valores do índice “c” apresentados para os modelos ajustados ao conjunto de dados, nas Tabelas 7 e 9, permitem constatar que a qualidade dos ajustes pode ser considerada como “ótima”, de acordo com o critério apresentado por Camargo & Sentelhas (1997), pois estão todos acima do valor limite de 0,85, corroborando a qualidade atestada pelos valores de R^2 obtidos nestes ajustes. Com base nestes critérios, tornar-se-ia viável estabelecer que um único modelo poderia descrever todo o conjunto de dados, ou seja, um único modelo de calibração poderia ser empregado na utilização da técnica da TDR, independente da composição granulométrica do solo.

No entanto, a observação da distribuição dos resíduos apresentados nas Figuras 3 e 4 revela que a amplitude dos seus valores, sobretudo na condição de solo úmido, pode ser consideravelmente superior ao valor de AD tomado como referência ($AD = 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Assim, embora todos os indicadores abordados sinalizem para o ajuste adequado dos modelos, pode-se constatar que a qualidade da estimativa realizada com a TDR utilizando qualquer um destes modelos, pode ser inadequada.

Em função destas observações, optou-se pelo ajuste dos modelos M2 e M3 para cada uma das posições estudadas no presente trabalho. Objetiva-se, dessa forma, verificar se a adaptação desses modelos a condições mais específicas promoverá melhores estimativas de umidade do solo, reduzindo o erro de estimativa da umidade do solo.

Na Figura 5 apresenta-se a série de dados referentes à posição inferior na toposequência (argila = 70%), bem como o modelo M2 ajustado a estes dados. A apresentação do modelo M3, que incorpora a D_s , somente poderia ser feita em uma superfície, uma vez que este modelo tem duas variáveis independentes, ou

seja, K_a e D_s . Pode-se observar neste gráfico que a amplitude de variação dos desvios em relação ao modelo permanecem na ordem de até 50% da AD, particularmente para valores de K_a acima de 30,0. Assim, a opção por ajustar um modelo especificamente para os dados nesta posição não promove redução substancial da amplitude de desvios, se comparado com o ajuste realizado para os dados em conjunto. Uma medida estatística associada a esta dispersão é o coeficiente de determinação (R^2) associado ao ajuste. Para o ajuste do modelo M2 ao conjunto de dados, este valor foi de 0,94 (Tabela 8), enquanto que para este conjunto de dados especificamente para a posição inferior, foi de 0,93 (Tabela 12), mostrando que, neste caso, o ajuste específico a esta série de dados não promoveu incremento substancial de qualidade.

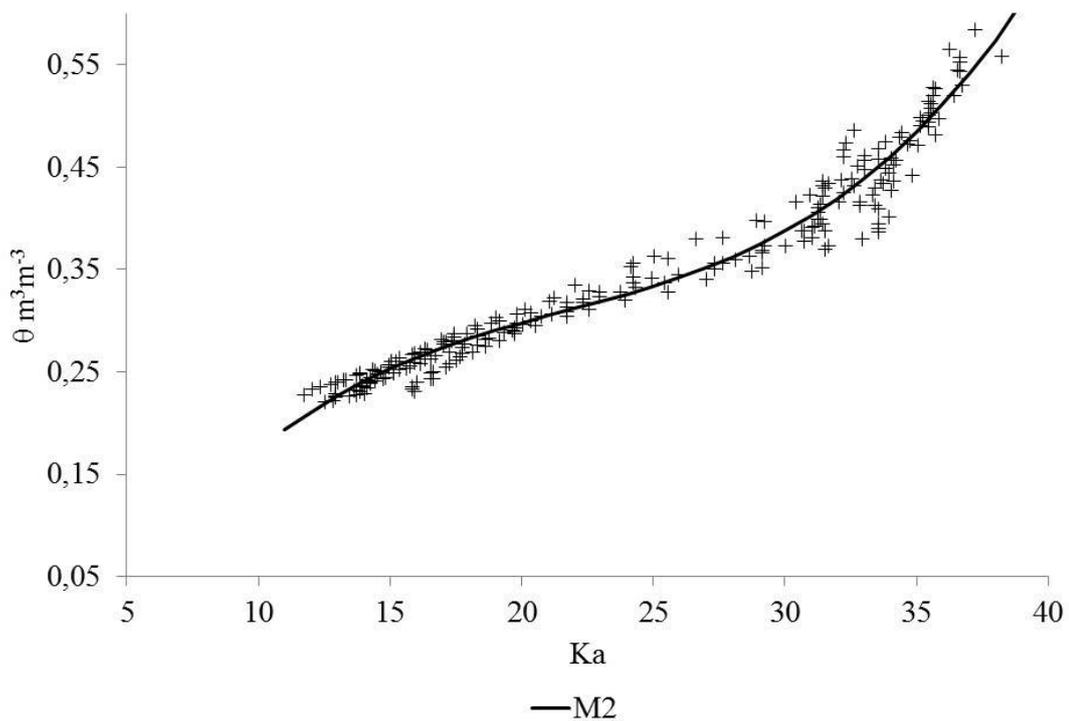


Figura 5 – Umidade do solo (θ) e K_a para a posição inferior na topossequência (conteúdo de argila no solo de 70%).

Na Tabela 11 são apresentados, para os modelos M2 e M3, os valores calculados do coeficiente de concordância “d” (WILLMOTT, 1981), o coeficiente de correlação “r” e o índice de desempenho “c” referentes à posição inferior na topossequência.

Tabela 11 – Valores do coeficiente de concordância “d” (WILLMOTT, 1981), coeficiente de correlação “r” e do índice de desempenho “c” para os modelos M2 e M3, ajustados à posição inferior na topossequência (conteúdo de argila no solo de 70%)

Índices	Modelos	
	M2	M3
d	0,980	0,988
r	0,967	0,980
c	0,947	0,968

Curiosamente, os valores de c obtidos para o ajuste a esta série de dados em particular foram ligeiramente inferiores aos obtidos para o ajuste ao conjunto completo de dados (conjunto das três séries), conforme mostrado na Tabela 7 para o modelo M2. Para o modelo M3, este índice apresentou uma melhora de 0,003, segundo os valores observados na Tabela 9. Estes indicadores revelam, portanto, que não há incremento de qualidade do ajuste, quando se toma esta série de dados isoladamente. Destaca-se, no entanto, que estes valores permitem caracterizar todos os ajustes como ótimos ($c > 0,85$).

Os gráficos obtidos pela comparação entre os valores de θ observados e estimados para os dados referentes à posição inferior na topossequência, para os modelos aqui empregados, são apresentados na Figura 6.

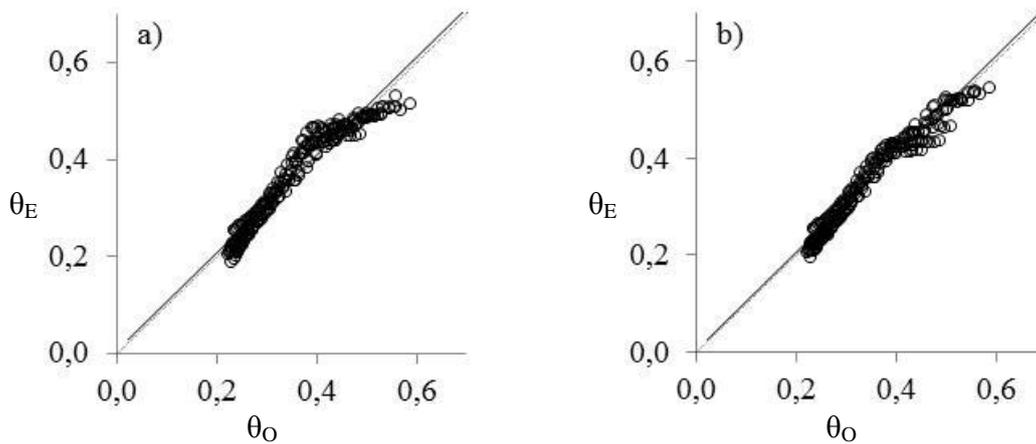


Figura 6 – Valores de θ observados (θ_O) e estimados (θ_E) pelos modelos a) M2 e b) M3 e modelo linear ajustado aos pares de valores referentes à posição inferior.

Com o propósito de descrever a qualidade dos modelos em estudo, e seu ajuste aos dados referentes à posição inferior na topossequência, conforme Figura 6, são apresentados, na Tabela 12, os valores dos coeficientes angular e linear dos modelos M2 e M3, bem como o coeficiente de determinação (R^2) obtido por meio de regressão linear.

Tabela 12 – Valores do coeficiente angular (a), linear (b) e de determinação (R^2) para os modelos M2 e M3, ajustados à posição inferior na topossequência (conteúdo de argila no solo de 70%)

Coeficientes	Modelos	
	M2	M3
a	1,008	1,010
b	0,007	0,004
R^2	0,934	0,960

Novamente, a observação dos valores da Tabela 12, em comparação às Tabelas 8 e 10, revela que o ajuste às condições mais específicas, neste caso aos dados da posição inferior na topossequência, gerou valores do coeficiente de

determinação ligeiramente inferiores para o modelo M2, enquanto os valores do modelo M3 apresentaram uma ligeira melhora. O mesmo também foi observado para os valores dos coeficientes angular e linear desses modelos.

A comparação dos valores de R^2 dos modelos, apresentados nas Tabelas 10 e 12, revela que eles pouco diferem entre si, não expressando a menor dispersão dos resíduos. Esses indicadores reforçam, portanto, que o ajuste dos modelos a esta série isoladamente, não promove incremento substancial de qualidade.

Na Figura 7 apresenta-se a série de dados referentes à posição intermediária na topossequência (Argila = 48%), bem como o modelo M2 ajustado a estes dados. O modelo M3 também foi ajustado a esta série de dados, contudo, sua apresentação somente poderia ser feita em uma superfície, uma vez que o mesmo tem duas variáveis independentes, ou seja, K_a e D_s . Pode-se observar no gráfico da Figura 7 que a amplitude de variação dos desvios em relação ao modelo permanecem na ordem de até 50% da AD, particularmente para valores de K_a acima de 25,0.

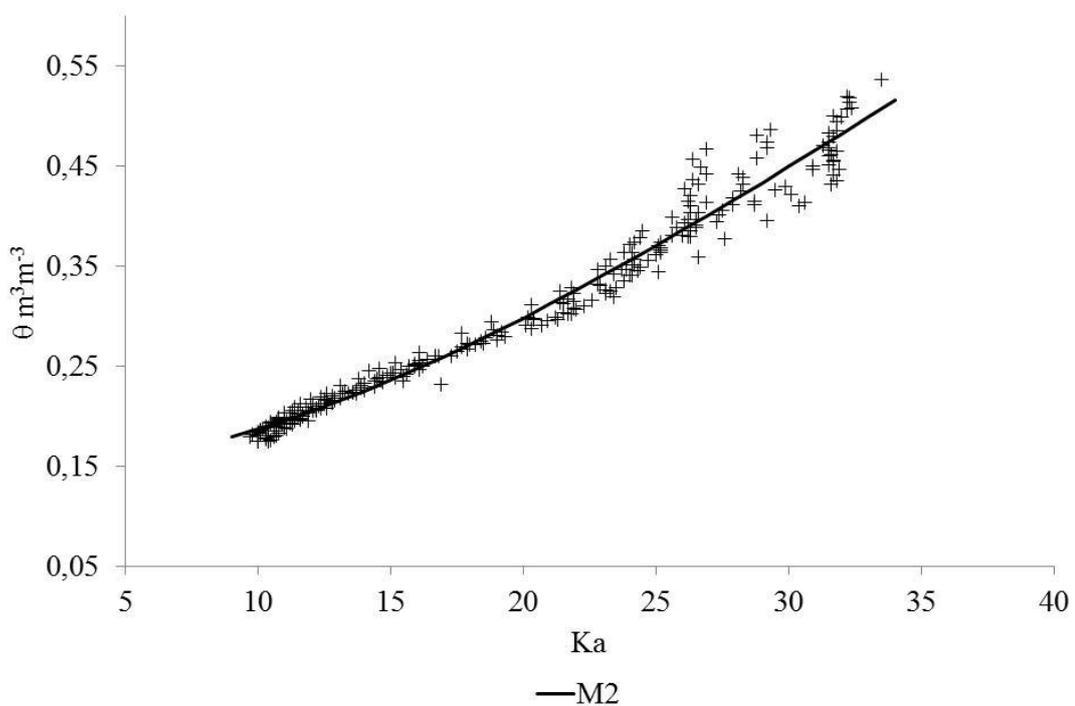


Figura 7 – Umidade do solo (θ) e K_a para a posição intermediária na topossequência (conteúdo de argila no solo de 48%).

Na Tabela 13 são apresentados, para os modelos em estudo, os valores calculados do coeficiente de concordância “d” (WILLMOTT, 1981), o coeficiente de correlação “r” e o índice de desempenho “c” referentes à posição intermediária na topossequência.

Tabela 13 – Valores do coeficiente de concordância “d” (WILLMOTT, 1981), coeficiente de correlação “r” e do índice de desempenho “c” para os modelos M2 e M3, ajustados à posição intermediária na topossequência (conteúdo de argila no solo de 48%)

Índices	Modelos	
	M2	M3
d	0,986	0,989
r	0,976	0,980
c	0,962	0,969

Os valores do coeficiente de concordância, coeficiente de correlação e do índice de desempenho, obtidos para o ajuste aos dados da posição intermediária na topossequência, em particular, foram ligeiramente superiores aos obtidos para o ajuste ao conjunto completo de dados (conjunto das três séries), conforme mostrado na Tabela 7 para o modelo M2 e na Tabela 9 para o modelo M3. Mesmo com a ligeira melhora observada, estes indicadores revelam que não há incremento de qualidade do ajuste, quando se toma esta série de dados isoladamente. Destaca-se, no entanto, que estes valores permitem caracterizar todos os ajustes como ótimos ($c > 0,85$).

Os gráficos obtidos pela comparação entre os valores de θ observados e estimados para os dados referentes à posição intermediária na topossequência, para os modelos empregados, são apresentados na Figura 8.

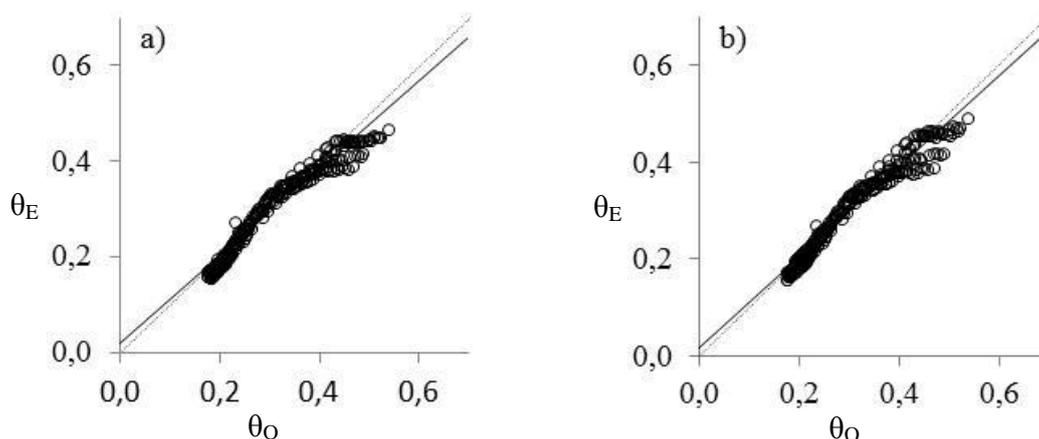


Figura 8 – Valores de θ observados (θ_O) e estimados (θ_E) pelos modelos a) M2 e b) M3 e modelo linear ajustado aos pares de valores referentes à posição intermediária na topossequência (conteúdo de argila no solo de 48%).

Com o propósito de descrever a qualidade dos modelos em estudo, ajustados, e seu ajuste aos dados referentes à posição intermediária na topossequência, conforme Figura 8, são apresentados, na Tabela 14, os valores dos coeficientes angular e linear dos modelos M2 e M3, bem como o coeficiente de determinação (R^2) obtido por meio de regressão linear.

Tabela 14 – Valores do coeficiente angular (a), linear (b) e de determinação (R^2) para os modelos M2 e M3, ajustados à posição intermediária na topossequência (conteúdo de argila no solo de 48%)

Coeficientes	Modelos	
	M2	M3
a	0,920	0,932
b	0,018	0,018
R^2	0,952	0,960

A observação dos valores da Tabela 14, em comparação às Tabelas 8 e 10, revela que o ajuste às condições mais específicas, neste caso aos dados da posição intermediária na topossequência, gerou valores do coeficiente de determinação ligeiramente superiores para ambos modelos. Contudo, o coeficiente angular (a) e o linear (b) foram ligeiramente inferiores.

A comparação dos valores apresentados nas Tabelas 10 e 14, revela que os valores de R^2 pouco diferem entre si, não expressando esta menor dispersão dos resíduos. Assim, a opção por ajustar um modelo especificamente para os dados nesta posição não promove redução substancial da amplitude de desvios, se comparado com o ajuste realizado para os dados em conjunto. Esses indicadores reforçam, portanto, que o ajuste dos modelos a esta série isoladamente, não promove incremento substancial de qualidade.

Na Figura 9 apresenta-se a série de dados referentes à posição superior na topossequência (argila = 14%), bem como o modelo M2 ajustado a estes dados. Pode-se observar neste gráfico que a amplitude de variação dos desvios em relação ao modelo é menor que o encontrado para as duas posições anteriores, mesmo para valores de K_a acima de 20. Por outro lado, nesta posição tem-se solo arenoso, o que implica em uma faixa de água disponível mais estreita que para as demais posições (Kramer e Boyer, 1995). Desta forma, esta menor amplitude dos desvios pode expressar percentual semelhante da AD nestas condições, promovendo margem de erro semelhante para as estimativas de umidade. Assim, a opção por ajustar um modelo especificamente para os dados nesta posição não promove redução substancial da amplitude de desvios, se comparado com o ajuste realizado para os dados em conjunto.

O modelo M3 também foi ajustado aos dados da posição superior na topossequência, contudo, sua apresentação somente poderia ser feita em uma superfície, uma vez que este modelo tem duas variáveis independentes, ou seja, K_a e D_s .

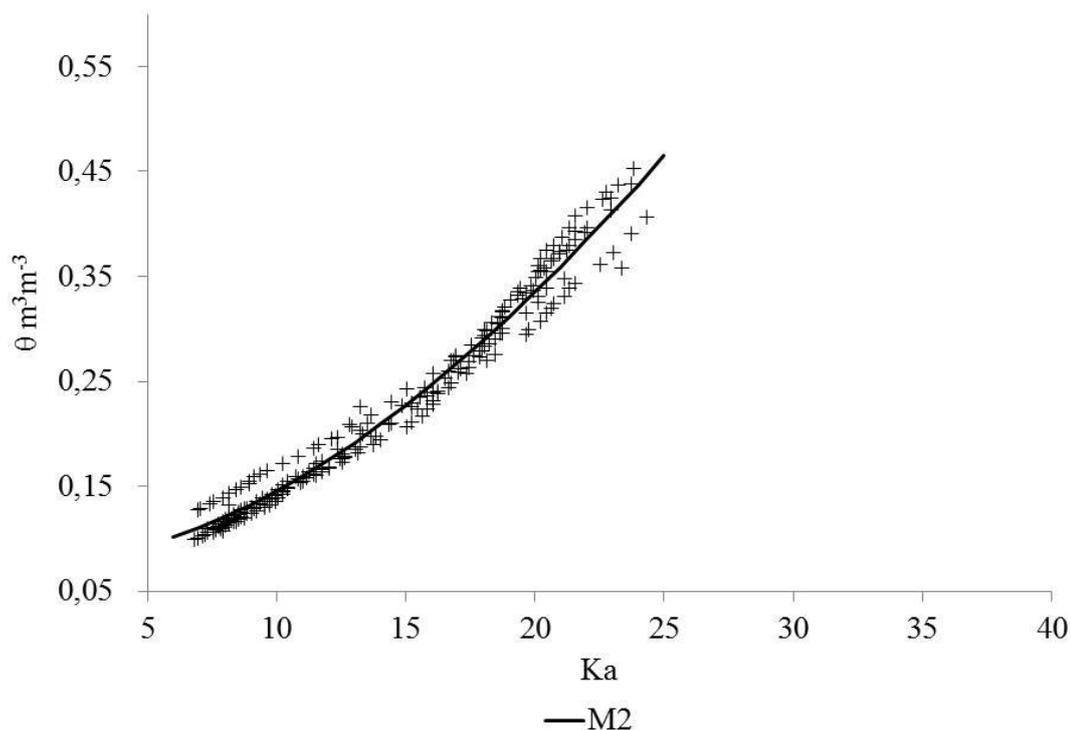


Figura 9 – Umidade do solo (θ) e K_a para a posição superior na topossequência (conteúdo de argila no solo de 14%).

Na Tabela 15 são apresentados, para os modelos M2 e M3, os valores calculados do coeficiente de concordância “d” (WILLMOTT, 1981), o coeficiente de correlação “r” e o índice de desempenho “c” referentes à posição superior na topossequência.

Tabela 15 – Valores do coeficiente de concordância “d” (Willmott, 1981), coeficiente de correlação “r” e do índice de desempenho “c” para os modelos M2 e M3, ajustados à posição superior na topossequência (conteúdo de argila no solo de 14%)

Índices	Modelos	
	M2	M3
d	0,973	0,974
r	0,968	0,964
c	0,942	0,939

Os valores do coeficiente de concordância, coeficiente de correlação e do índice de desempenho, obtidos para o ajuste aos dados da posição superior na topossequência, em particular, foram ligeiramente inferiores aos obtidos para o ajuste ao conjunto completo de dados (conjunto das três séries), conforme mostrado na Tabela 7 para o modelo M2 e na Tabela 9 para o modelo M3. Estes indicadores revelam, portanto, que não há incremento de qualidade do ajuste, quando se toma esta série de dados isoladamente. Destaca-se, no entanto, que estes valores ainda permitem caracterizar todos os ajustes como ótimos ($c > 0,85$).

Os gráficos obtidos pela comparação entre os valores de θ observados e estimados para os dados referentes à posição superior na topossequência, para os modelos M2 e M3, são apresentados na Figura 10. A observação dos gráficos revela que a dispersão dos valores em torno do modelo linear ajustado é maior para o modelo M3, corroborada pelo menor valor de R^2 observado para este modelo no ajuste para a posição superior na topossequência (Tabela 16).

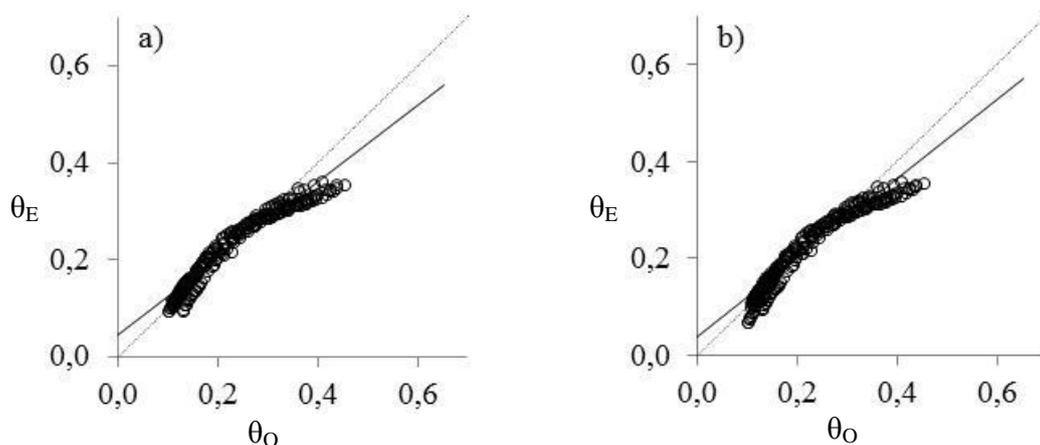


Figura 10 – Valores de θ observados (θ_O) e estimados (θ_E) pelos modelos a) M2 e b) M3 e modelo linear ajustado aos pares de valores referentes à posição superior na topossequência (conteúdo de argila no solo de 14%).

Com o propósito de descrever a qualidade dos modelos em estudo, ajustados, e seu ajuste aos dados referentes à posição superior na topossequência, conforme Figura 10, são apresentados, na Tabela 16, os valores dos coeficientes angular e linear dos modelos M2 e M3, bem como o coeficiente de determinação (R^2) obtido via regressão linear.

Tabela 16 – Valores do coeficiente angular (a), linear (b) e de determinação (R^2) para os modelos M2 e M3, ajustados à posição superior na topossequência (conteúdo de argila no solo de 14%)

Coeficientes	Modelos	
	M2	M3
a	0,791	0,814
b	0,045	0,038
R^2	0,936	0,929

Neste ajuste, em específico, o coeficiente de determinação (R^2) associado ao ajuste de ambos modelos apresentou-se pior do que para o ajuste ao conjunto de dados (0,94 e 0,95 para M2 e M3, respectivamente, conforme Tabelas 8 e 10), mostrando que, neste caso, o ajuste a esta série de dados não promoveu incremento substancial de qualidade.

Para esta série de dados, referente à posição superior, mais uma vez, a dispersão dos resíduos não difere substancialmente da distribuição de resíduos para as duas séries anteriores, assim como não difere expressivamente da dispersão de resíduos para os dados em conjunto. Destaca-se que nesta série a presença de um erro sistemático é marcante, o que é expresso pelo coeficiente angular da ordem de 0,8 para os modelos lineares ajustados aos resíduos referentes aos dois modelos.

Embora os critérios mais recentemente empregados para a caracterização da qualidade do ajuste de modelos matemáticos aos dados experimentais sinalizem, no presente trabalho, para que os modelos em questão apresentem

qualidade ótima, uma análise minuciosa revela que cuidados adicionais devem ser tomados. Para tanto, mostra-se, na Figura 11, o modelo M2 ajustado ao conjunto de dados e a cada posição na topossequência, individualmente.

A observação da Figura 11 torna evidente que, para valores de θ entre $0,20 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ e $0,30 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (K_a da ordem de 12 a 18) todos os modelos promovem estimativas de umidade muito parecidas. Contudo, para valores θ abaixo de $0,20 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (K_a abaixo de 12), condição de solo mais seco, os modelos divergem. O mesmo pode ser observado para valores de θ acima de $0,30 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (K_a acima de 18), condição de solo mais úmido e também a de maior interesse agrônomo. Nessa última, em particular, a utilização de um modelo que não descreva adequadamente as características locais pode levar facilmente a erros de estimativa da ordem de 50% da AD.

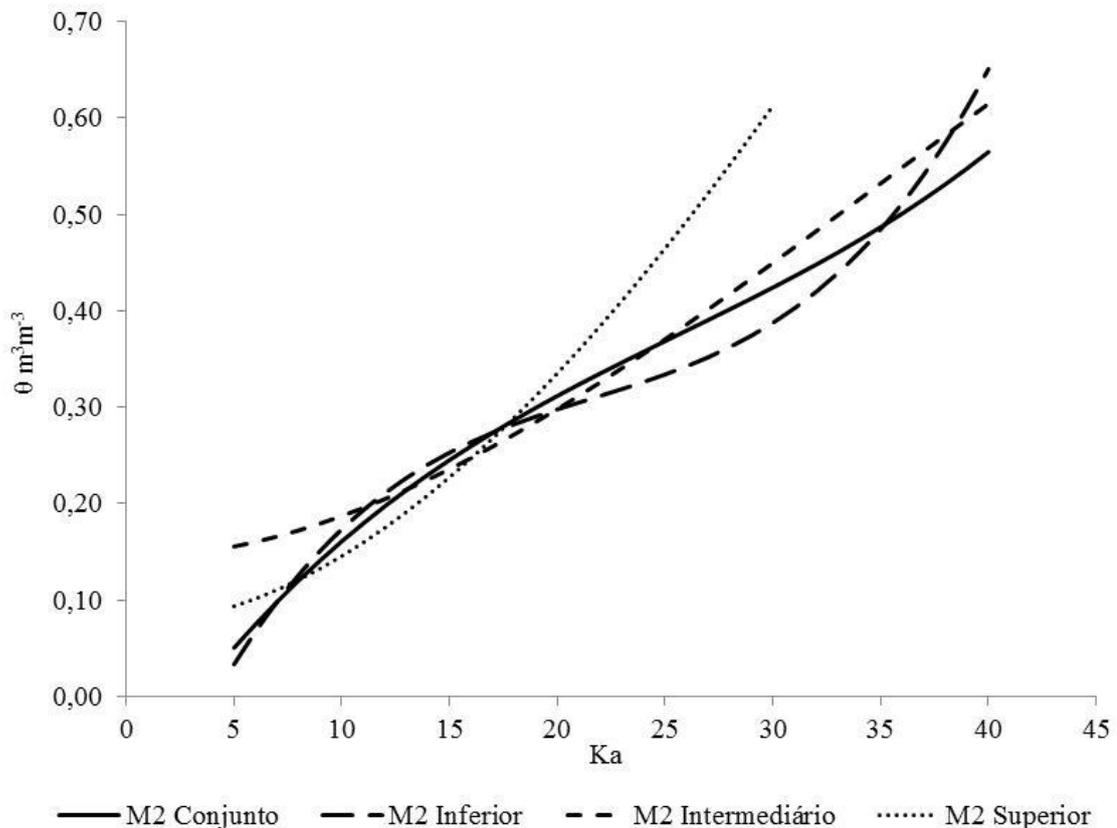


Figura 11 – Modelo M2 ajustado ao conjunto de dados e a cada posição na topossequência, individualmente.

Verifica-se ainda, na Figura 11, o efeito da textura do solo sobre os modelos, uma vez que estes apresentam linhas distintas para cada ajuste, corroborando a hipótese inicial de que a composição granulométrica influencia a curva de calibração da TDR. Observa-se que para a posição inferior na topossequência o modelo descreve uma curva característica de modelos polinomiais cúbicos. Para as posições intermediária e superior, o coeficiente cúbico decresce enquanto o coeficiente quadrático aumenta seu valor, conforme observado na Tabela 4, o que promove o formato de uma parábola para a linha referente a cada um destes modelos, conforme pode ser visto na Figura 11.

A observação dos resultados leva ao entendimento de que o modelo M4, o qual incorpora DS e conteúdo de argila em sua fórmula, foi o que apresentou o melhor ajuste. Dessa forma, fica evidente que uma calibração local, considerando as variáveis físicas do solo, pode levar a estimativas da umidade mais coerentes com a real condição de umidade do solo. A análise da qualidade do ajuste deste modelo, embora revele que este é o melhor, evidencia um ganho de qualidade pouco expressivo, em termos gerais, em relação aos demais modelos. Assim, pode-se constatar que mesmo este modelo pode levar a estimativas de umidade cuja margem de erro pode expressar um percentual elevado da AD, conforme identificado no presente trabalho. Esta se configura como uma limitação inerente ao emprego da técnica da TDR, a qual não pode ser eliminada por meio do ajuste de um modelo de calibração.

5. CONCLUSÕES

A relação entre umidade do solo e sua correspondente constante dielétrica, medida por meio da técnica da TDR, foi fortemente influenciada pela composição granulométrica do solo;

Um único modelo de calibração, de caráter geral, como o de Topp et al. (1980), para todos os solos, não deve ser empregado para a TDR. Calibração local faz-se necessária;

A utilização de um modelo de calibração para o conjunto de dados referentes às diferentes composições granulométricas, embora demonstrando indicadores de qualidade do ajuste com valores elevados, deu origem a desvios cujo valor absoluto pode superar o valor referente à faixa de água disponível;

O modelo com melhor ajuste foi o que incorporou a densidade do solo e o seu teor de argila ($\theta = 0,07307 - 0,09891Ds + 0,49551Argila + 0,01399KaDs - 0,02544KaArgila - 0,10708DsArgila + 0,00053Ka^2 - 0,00036Ka^2Ds + 0,00022Ka^2Argila$), evidenciando a influencia da granulometria sobre a curva de calibração;

Para fins práticos, seria desejável a utilização deste modelo completo, empregando-se valores médios de teor de argila e correspondente densidade do solo média, para as três posições identificadas no presente estudo, na topossequência em questão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M.(Ed.). **Uso e manejo de irrigação**. Embrapa informação tecnológica, Brasília, 2008, 528p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Citações e Referências Bibliográficas**. Disponível em: <<http://www.leffa.pro.br/textos/abnt.htm#5.15.2>>. Acesso em: Janeiro de 2013.

AZEVEDO, A. C.; PEDRON, F. de A.; DALMOLIN, R. S. D. A evolução da vida e as funções do solo no ambiente. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. v. 5, p. 1-48.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J.M.; REIS, E. F.; DILLY, L. Propriedades físicas de um CAMBISSOLO HÚMICO Álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, 30:91-95, 2000.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 13.ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2002. 960p.

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.

CARROW, R. N. Drought resistance aspects of turfgrasses in the southeast: evapotranspiration and crop coefficients. **Crop Science**, Madison, v.35, n.6, p.1685-1690, 1995.

CARVALHO, R; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.11, p.1153-1155, 2004.

CASANELAS, J. P.; REGUERIN, M. L.; LABURU, C. R. De. **Edafologia para la agricultura y el medio ambiente**. 2 ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1999. 849p.

- 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. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 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.
- 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.; ARRUDA, F. B. Aplicações da técnica de TDR: manejo da água no solo. In: **I WORKSHOP SOBRE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE TDR (REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO) NA AGRICULTURA**, 1. 2001, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP/FEAGRI, 2001, p. 129-145.
- COELHO, E. F.; OR, D. **Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management**. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.39, n.6, p.2007-16, 1996.
- 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30: 23 – 30. 2006.
- COELHO, G. F.; GONÇALVES JR., A. C.; SEIDEL, E.; CARVALHO, E. A.; SCHWANTES, D. Avaliação da granulometria de solos de sete municípios da região oeste do Paraná. **Revista Sinergismus Scyentifica**, v. 4, n. 1, s/p. 2009.
- 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2. 2008.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic detection of soil moisture. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v.3, n.1, p.76-86, 1977.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA).
Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed., Rio de Janeiro: Embrapa solos. 2006, 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA).
Manual de métodos de análise de solo. 2. Ed. Revisão atualizada. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA Centro Nacional de Pesquisa de Solos (CNPS), 1997. 212p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1).
- EPSTEIN, E.; GRANT, W. J.; STRUCHTEMEYER, R. A. Effects of stones on runoff, erosion and soil moisture. **Soil Science Society American Proceedings**, Wisconsin, v. 30, n.1, p. 638-640. 1966.
- FAGUNDES, E. A. A.; KOETZ, M.; RUDEL, N.; SANTOS, T. S.; PORTO, R.
Determinação da infiltração e velocidade de infiltração de água pelo método de infiltrômetro de anel em solo de cerrado no município de Rondonópolis - MT. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.8, N.14; p. 369. 2012.
- FASSBENDER, W.H. **Química de suelos**. San José, Costa Rica: IICA, 1986. 398 p.
- FELLNER-FELDEGG, H. The measurement of dielectrics in the time domain. **Journal of Physical Chemistry**, Washington, 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.
- FIORIN, T. T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2008. 116 p.
- GONÇALVES, 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5. 2011.

HANEK, G. L.; TRUEBE, M. A.; KESTLER, M. A. **Using Time Domain Reflectometry (TDR) and Radio Frequency (RF) Devices to Monitor Seasonal Moisture Variation in Forest Road Subgrade and Base Materials.** USDA - United States Department of Agriculture. FS - Forest Services. Technology & Development Program. July 2001. Disponível em: <<http://www.fs.fed.us/t-d/pubs/html/00771805/00771805.html>>. Acesso em: Janeiro de 2013.

HASHIGUTI H. T.; HARA A. T.; SANTOS A. E.; TAVORE R. V.; GONÇALVES A. C. A. Importância do modelo de calibração empregado na estimativa da umidade de um solo, com a técnica da TDR. **VII EPCC – ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA.** CESUMAR. Maringá. 2011. Disponível em: <http://www.cesumar.br/prppge/pesquisa/epcc2011/anais/heraldo_takao_hashiguti2.pdf> Acesso em: Janeiro de 2013.

HASHIGUTI, H. T. **Estimativa da umidade do solo por meio da técnica da TDR, utilizando análise de resíduos.** Maringá, 2013. (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual de Maringá.

HERRMANN JR., P. S. P. Aspectos básicos da Reflectometria no domínio do tempo (TDR) e potencialidades de aplicação na física do solo. In: **I WORKSHOP SOBRE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE TDR (REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO) NA AGRICULTURA**, 2001, Campinas. **Anais...** UNICAMP/FEAGRI, 2001. p. 37-50.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **CARTAS CLIMÁTICAS DO ESTADO DO PARANÁ.** Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=860>>. Acesso em: Novembro de 2012.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo – planta – atmosfera.** São Paulo: Nobel, 1984. 408p.

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils.** San Diego: Academic Press, 1995. 495p.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 3ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 84p

- MICHELON, C. J. **Pedofunções para retenção de água de solos do Rio Grande do Sul irrigados por aspersão**. Tese (doutorado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.
- MORAES, M. H.; BENEZ, S. H.; LIBARDI, P. L. Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimento das raízes das plantas de soja. **Bragantia**, Campinas, v. 54, n. 2, p. 393-403, 1995.
- NEWTON, R. W. **Microwave remote sensing and its applications to soilmoisture detection**. Austin: Texas University, 1977. (College Station, Technical Report, RSC-81).
- ONU BRASIL. **Rio+20 Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável. Água e Saneamento**. Departamento de Informação Pública das Nações Unidas. Junho de 2012. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/rio20/temas-agua/>>. Acesso em: Janeiro de 2013.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, 27:29-48, 2003.
- REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1996. 513p.
- REICHARDT, K. & TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 2004. 478p.
- REIS, M. S.; FERNANDES, C. R.; GRIMALDI, C.; SARRAZIN, M.; GRIMALDI, M. Variação da composição granulométrica e orgânica do solo em uma topossequência da microrregião de Marabá (PA). Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências Naturais, Belém, v. 2, n. 3, p. 33-44. 2007.
- ROBINSON, D. A., BELL, J. P., BATCHELOR, C. H. Influence of iron minerals on the determination of soil-water content using dielectric techniques. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.161, n.1-4, p. 169-180, 1994.
- ROSOLEM, C. A.; VALE, R. L.; GRASSI FILHO, H.; MORAES, M. H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, p. 491-497. 1994.

- SANT'ANA, J. A. V.; COELHO, E. F.; SILVA JR, J. J.; SANTANA JR, E. B.; VEINROMBER JR. Desempenho de sondas de TDR manufaturadas de diferentes comprimentos de hastes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4. 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.
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Revisada e ampliada. Viçosa: Sociedade Brasileiro de Ciência do Solo - SBCS, 2005. 100 p.
- SAUER, T. J.; LOGSDON, S. D. Hydraulic and physical properties of stony soils in a small watershed. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 6, p. 1947-1956. 2002.
- SERRARENS, D.; MACINTYRE, 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. Determinação automática de teor de água em LATOSSOLO ROXO Distrófico com uso de reflectometria de onda. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, 27., Poços de Caldas. **Anais...** Lavras: SBEA/UFLA, p. 154-156. 1998.
- SILVA, I. F. da; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilidade de agregação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, n.1, p.113-17, 1997.
- SKIERUCHA, W. The accuracy of soil moisture measurement by TDR technique. **International Agrophysics**, 14:417-426, 2000.
- SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. TDR Moisture Measurement product information: 6050X1 TRase sYsTeM I. Disponível em: <<http://www.soilmoisture.com/PDF%20Files/tdrtrase.pdf>>. Acesso em: Janeiro de 2013.
- SOUZA, C. F.; FOLEGATTI, M. V.; MATSURA, E. E.; OR, D. Calibração da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) para a estimativa da concentração da solução no solo. **Engenharia Agrícola**. vol. 26 no.1. 2006 a.

- SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 6, n. 1. 2002.
- SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. ; TESTEZLAF, R.. Avaliação de sonda de TDR multihaste segmentada na determinação do bulbo molhado em irrigação localizada. In: **XXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, Fortaleza. 2000.
- SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E.; FOLEGATTI, M. V.; COELHO, E. F.; OR, D. Sondas de TDR para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, v. 11, n. 1, p. 12-25. 2006 b.
- 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**, v. 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v27, p.575-582. 2003.
- TOMMASELLI, J. T. G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time-Domain Reflectometry)**. Piracicaba, SP, 1997. 109p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de reflectometria de micro-ondas para dois solos paulistas típicos. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 25., 1995, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 1995, v.1, p.24-26.
- TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.9, p.1145-1154, 2001.
- TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, p.574-582, 1980.
- TRINTINALHA, M. A. **Avaliação da técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR) na determinação de umidade em NITOSSOLO**

- VERMELHO Eutroférico.** Maringá, 2000. (Dissertação de Mestrado).
Universidade Estadual de Maringá. 67p.
- TRINTINALHA, M. A. **Utilização da TDR para avaliação da distribuição espacial e estabilidade temporal do armazenamento de água em um NITOSSOLO VERMELHO Distroférico.** 2005. Tese (Doutorado)
Universidade Estadual de Maringá, Maringá. 139p.
- TRINTINALHA, M. A.; GONÇALVES, 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 de TDR em um NITOSSOLO VERMELHO Distroférico. **Acta Scientiarum.** v. 23, n. 5, p. 1165-1171, 2001.
- 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 Scientiarum.** 26:353-360, 2004.
- 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,** Washington, DC, v.15, p.977-985, 1980.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography,** v.2, p.184-194, 1981.
- YOUNG, M. H.; WIERENGA, P. J.; MANCINO, C. F. Monitoring near surface soilwater storage in turfgrass using time domain reflectometry and weighing lysimetry. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v.61, n.4, p.1138-1146,1997.