



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

DENIZE MARIA DE OLIVEIRA SILVA

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES DIELÉTRICOS ECH₂O PARA SOLOS
DE REFERÊNCIA NA ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO**

RECIFE / 2016

S856c Silva, Denize Maria de Oliveira
Calibração de sensores dielétricos ECH2O para solos de
referência na Zona da Mata de Pernambuco / Denize Maria de
Oliveira Silva. – Recife, 2016.
50 f.: il.

Orientadora: Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de
Engenharia Agrícola, Recife, 2016.
Referências.

1. Umidade 2. Irrigação 3. Instrumento de medição
4. Capacitância I. Almeida, Ceres Duarte Guedes Cabral de,
orientador II. Título

CDD 630

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DENIZE MARIA DE OLIVEIRA SILVA

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES DIELÉTRICOS ECH₂O PARA SOLOS
DE REFERÊNCIA NA ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em cumprimento aos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ceres Duarte Guedes
Cabral de Almeida

RECIFE / 2016

DENIZE MARIA DE OLIVEIRA SILVA

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES DIELÉTRICOS ECH₂O PARA SOLOS DE
REFERÊNCIA NA ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em cumprimento aos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida.

Aprovada em 25 de fevereiro de 2016.

Orientadora:

Prof^a Dr^a Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida - UFRPE

Comissão examinadora:

Prof^o Dr^o Gerônimo Ferreira da Silva - UFRPE

Prof^o Dr^o Jaedson Cláudio Anunciato Mota – UFC

Conquistas

Foi da terra que vir do
nada,
Nessa camada espessa e
muito pesada que penso,
que enfada
Na busca do prazer às
conquistas de minha alma.
Se forte fui hoje já não sei,
Então como era e quem
dera eu chegar lá como
doutro vez cheguei.
Com a coroa de louro aos
pedaços de meu corpo
E renascido de minha
calma,
Na eterna alegria de meu
corpo
Que celebra a vitória de
minha alma.

Marzo Deutsch 25.01.2016

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e ao programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade oferecida para a realização do curso de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro referente à concessão da bolsa de pesquisa.

Ao Coordenador da Pós Graduação em Engenharia Agrícola Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim pelo apoio na condução do experimento.

Ao Prof. Dr. Enio Farias de França e Silva por ceder a casa de vegetação e pelo apoio fundamental em meu experimento.

À Prof^a. Dr^a. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida pela orientação concedida durante o período de desenvolvimento da pesquisa, além do constante incentivo que me permitiram a conclusão desta etapa de minha formação acadêmica, contribuindo também para um maior progresso profissional e pessoal.

Ao Prof. Brivaldo Gomes de Almeida, pelas orientações e pelo espaço cedido no laboratório, mostrando-se disponível sempre em ajudar.

Ao Instituto Agrônomo de Pernambuco - IPA (unidade Itambé e Itapirema) e a Usina Cucaú em Rio Formoso (PE), por disponibilizar os solos para este estudo.

À Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento de Recife - UEP Recife, vinculada à Embrapa Solos, pela atenção e disponibilização do ZAPE.

Ao Engenheiro Agrônomo José Fernando Wanderley Fernandes Lima pelo apoio e orientação nas coletas e preparo dos solos.

Aos meus pais, Feliz Ferreira da Silva e Margarida Maria Jordão, por seu amor, apoio, por suas palavras de ânimo e por ter contribuído pela formação do meu caráter. Minha eterna gratidão.

À minha filha, Marize Eduarda Oliveira, pela compreensão de minha ausência muitas vezes necessária em sua vida e pelo apoio fundamental em meus estudos. Minha razão de vida.

Aos meus irmãos, cunhadas e cunhado. São eles: Felix Ferreira da Silva Junior, Marcos Aurélio da Silva, Wilma Maria da Silva, Sineide Ferreira de Andrade, Maria Angélica

José da Silva e Teotônio José da Silva. Sou grata a todos pelo apoio, me preservando dos problemas familiares e me fortalecendo quando necessário.

Ao meu amigo, escritor e poeta Marzo Deutsch, pelos ensinamentos no apoio na coleta do solo, na ajuda do material para pesquisa e nas experiências compartilhadas.

Aos estagiários Rebeca Neves Barbosa, Maria Gabriela Freire Lins e Antônio Diomescio da Silva Filho que foram fundamentais na condução do experimento, principalmente nas pesagens dos solos.

Aos amigos e eternos companheiros Diego César dos Santos Arruda, Eulâmpio Alves da Silva Filho, Pedro Francisco Sanguino Ortiz e Carolina de Lima França.

Aos colegas de mestrado pelas experiências compartilhadas durante o curso.

SILVA, D.M.O. **Calibração de sensores dielétricos ECH₂O para solos de referência na Zona da Mata de Pernambuco**. 2016. 50f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal Rural de Pernambuco UFRPE. Recife/ PE.

RESUMO

A eficiência no manejo da irrigação depende dentre outros aspectos, dos instrumentos de medições da umidade do solo, de modo a racionalizar o uso da água e energia e maximizar a produtividade das culturas. O objetivo desse estudo, foi calibrar os sensores dielétricos ECH₂O modelos EC-5 e 5TE (Decagon Devices, IncTM) para solos de referência localizados na Zona da Mata de Pernambuco: Espodossolo Humilúvico (EK), Argissolo Amarelo (PA), Latossolo Amarelo (LA) e Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA). O experimento foi conduzido em casa de vegetação da UFRPE, Recife-PE. Foram coletadas amostras com estrutura deformada e não deformada, na profundidade de 0-40 cm. No laboratório, as amostras com estrutura deformada foram destorroadas e passadas em peneira com malha de 4,75 mm para retiradas de raízes e, em seguida, colocadas em seis vasos plásticos com volume útil de 4,66 L cada, de modo a manter a respectiva densidade deste solo em campo. Os fundos dos recipientes foram previamente perfurados, forrados com brita e coberto com bidim, a fim de permitir a drenagem do excesso de água, evitando-se perdas de solo. Em quatro vasos, foram instalados um sensor de cada modelo e nos demais vasos apenas o EC-5. Os conjuntos (vaso, solo, brita, bidim e sensores) foram pesados diariamente três vezes em horário fixo (8h, 12h e 16h) até que as variações diárias de massa se tornassem constantes nas pesagens. Durante esse período, foram realizadas leituras horárias da umidade volumétrica medida pelos sensores de umidade em $m^3 m^{-3}$, utilizando estações de coleta de dados em50 (Decagon Devices IncTM). Os resultados foram submetidos às análises de regressão comparando as leituras dos sensores e as respectivas umidades volumétricas calculadas com base na umidade gravimétrica. Índices estatísticos de desempenho foram utilizados para avaliar a eficiência do modelo gerado. O índice estatístico de Willmott e o RMSE foram utilizados para avaliar a qualidade do ajuste entre os valores observados e estimados. O sensor EC-5 apresentou resposta linear para todos os solos; já o 5TE apresentou resposta linear em três dos quatro solos estudados. Os resultados encontrados mostraram que a calibração melhorou o desempenho dos sensores reduzindo RMSE de 0,0552 para 0,0112 do EC-5 e de 0,0821 para 0,0198 do 5TE do EK, de 0,0678 para 0,0223 do EC-5 e de 0,0873 para 0,0207

do 5TE do PA, de 0,0672 para 0,0173 do EC-5 e de 0,0709 para 0,0138 do 5TE do LA, de 0,0402 para 0,0208 do EC-5 e de 0,0544 para 0,0227 do 5TE do PVA; os índices de Willimott encontrados foram $d = 0,99$ para EK, $d = 0,98$ para PA, $d = 0,99$ para LA e $d = 0,98$ para PVA, todos classificados como ótimos.

Palavras-chave: umidade, irrigação, instrumento de medição, capacitância.

SILVA, D.M.O. **Sensor calibration dielectrics ECH₂O for reference soils in Pernambuco Forest Zone**. 2016. 50f. Dissertation (Master in Agricultural Engineering), Federal Rural University of Pernambuco UFRPE. Recife PE.

ABSTRACT

The efficiency in the management of irrigation depends, among other things, instruments of soil moisture measurements, in order to rationalize the use of water and energy and maximize crop yields. The aim of this study was to calibrate the dielectric sensors ECH₂O EC-5 and 5TE models (Decagon Devices, Inc. TM) to reference soils located in Pernambuco Forest Zone: Espodossolo Humilúvico (EK), Argissolo Amarelo (PA), Latossolo Amarelo (LA) e Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA). The experiment was conducted in a greenhouse of UFRPE, Recife-PE. Samples were collected with deformed and non-deformed structure at a depth of 0-40 cm. In the laboratory, samples were deformed structure were crushed and passed through a 4.75 mm sieve taken from roots and then placed in six plastic pots with a volume of 4.66 L each, in order to maintain their density of the soil in the field. The bottoms of the containers have previously been drilled, lined with crushed stone and covered with bidim felt in order to permit drainage of excess water, preventing soil losses. Four pots were installed a sensor of each model and the other pots only EC-5. The sets (pot, soil, gravel, bidim and sensors) were weighed three times daily at a fixed time (8h, 12h and 16h), until the stability of moisture. During this period they were performed hourly readings of soil moisture measured by moisture sensors, $m^3 m^{-3}$, by data collection stations EM50 (Decagon Devices Inc TM). The results were submitted to regression analysis comparing sensors readings with volumetric moisture calculated based on the gravimetric moisture. Performing statistical indices were used to assess the efficiency of the proposed model. The statistical index Willmott and RMSE were used to evaluate the quality of fit between observed and estimated values. The EC-5 sensor showed a linear response for all soils and the 5TE showed a linear response in three of the four soils. The results showed that the calibration improved the performance of sensors reducing RMSE, in EK soil of 0.0552 to 0.0112 the EC-5 and 0.0821 to 0.0198 of the 5TE; in PA from 0.0678 to 0.0223 to the EC -5 and from 0.0873 and 0.0207 for the 5TE; in LA from 0.0672 to 0.0173 to the EC-5 and 0.0709 to 0.0138 to the 5TE; and PVA from 0.0402 to 0.0208 to the EC-5 and from 0.0544 to 0.0227 to the 5TE; Willimott

index found were $d = 0.99$ for EK, $d = 0.98$ for PA, $d = 0.99$ for LA and $d = 0.98$ for PVA, all classified as great.

Keywords: moisture, irrigation, measuring instrument, capacitance.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- Localização dos perfis de solos de referência do Estado de Pernambuco.....	23
FIGURA 2- Fotos dos instrumentos utilizados neste estudo. Sensor EC-5(a); sensor 5TE (b); datalogger (c).....	26
FIGURA 3- Representação do vaso na montagem do experimento.....	27
FIGURA 4- Saturação do solo por elevação gradual.....	31
FIGURA 5- Conjunto solo, vaso e sensores na bancada na casa de vegetação.....	31
FIGURA 6- Curvas de secagem dos solos conforme valores de umidade medidos pelos sensores EC-5 e 5TE, segundo a calibração do fabricante e conforme a umidade obtida por pesagem.....	34
FIGURA 7- Conteúdo volumétrico de água medido e estimado sem calibração e com calibração.....	36
FIGURA 8- Conteúdo volumétrico de água medido e estimado pelo sensor 5TE com e sem calibração.....	40
FIGURA 9- Temperatura no solo medida nos horários de pesagens durante o experimento...	42
FIGURA 10- Comparação entre as leituras estimadas pelos sensores EC-5 e 5TE, antes da calibração.....	44
FIGURA 11- Umidade volumétrica estimada após a calibração do sensor EC-5 e 5TE.....	45

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- Caracterização física dos solos estudados (RIBEIRO et al., 1999).....	29
TABELA 2- Densidade calculada dos solos estudados.....	30
TABELA 3 - Valores dos índices de desempenho conforme Carmargo e Sentelhas (1997) ...	33
TABELA 4 - Amplitude de valores do teor de água das amostras de solo.....	35
TABELA 5 - Valores do RMSE ante e depois da calibração do EC-5.....	38
TABELA 6 - Análise de variância dos modelos lineares ajustados entre os valores medidos de θ em função dos valores estimados pelo sensor EC-5.....	39
TABELA 7 - Valores do RMSE ante de depois da calibração do 5TE.....	41
TABELA 8 - Análise de variância dos modelos ajustados entre os valores medidos e estimados do sensor 5TE após a calibração	43

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
CAPÍTULO 1 -REVISÃO DE LITERATURA	
1.1 Perdas de água em sistema de irrigação por problemas de manejo.....	17
1.2 Determinação de umidade no solo.....	17
1.3 Métodos de determinação direta de umidade no solo.....	18
1.4 Métodos Indiretos de determinação de umidade no solo.....	18
1.4.1 Reflectometria com domínio do tempo (TDR).....	19
1.4.2 Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) – Sensores Capacitivos.....	19
1.5 A influência da salinidade e temperatura do solo nos sensores.....	20
1.6 Calibração de sensores dielétricos.....	21
CAPÍTULO 2 -MATERIAL E MÉTODOS	
2.1. Caracterização da área de ocorrência dos solos estudados.....	23
2.2. Caracterização dos solos estudados.....	24
2.2.1. Solo 1 – Argissolo Amarelo.....	24
2.2.2. Solo 2 – Espodossolo Humilúvico.....	24
2.2.3. Solo 3 – Latossolo Amarelo.....	25
2.2.4. Solo 4 – Argissolo Vermelho-Amarelo.....	25
2.3. Características dos sensores de umidade do solo.....	25
2.4. Amostragem dos solos e preparo das amostras.....	26
2.5. Determinação das propriedades físico-hídricas dos solos.....	27
2.6 Caracterização física dos solos estudados.....	28
2.7 Cálculos da massa de solo no vaso.....	29
2.8 Instalação e calibração dos sensores.....	30
2.9 Análises estatísticas.....	32
RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

INTRODUÇÃO

A revolução agrícola, apesar de ter proporcionado aumento de rendimento de várias culturas, contribuiu para o aumento da escassez de água no mundo. Neste sentido, tendo em vista que no mundo as atividades agrícolas são responsáveis por 70% do uso de água doce, atualmente os esforços são para aumentar a disponibilidade e a eficiência do uso dessas águas (ANA, 2012).

O problema é que grande parte da água aplicada na irrigação é desperdiçada, devido o manejo inadequado da irrigação, causando lixiviação e percolação de nutrientes agrícolas em solos cultivados com efeitos significativos em lagos, rios e águas subterrâneas. Por isso, a eficiência do uso da água na agricultura é um fator chave para conservar os recursos hídricos cada vez mais escassos. O aumento dessa eficiência depende em grande parte do tipo de sistema de irrigação e da quantidade de água efetivamente disponibilizada à planta (COELHO et al., 2005a).

O manejo racional da irrigação precisa ser eficiente considerando a preservação dos recursos hídricos disponíveis para maximizar a produtividade das culturas, fazendo bom uso da água, da energia, dos fertilizantes e de outros insumos empregados na produção sem comprometer os recursos naturais e considerando os aspectos sociais e ecológicos da região (SANTOS JÚNIOR et al., 2014).

As necessidades hídricas das culturas variam conforme o estágio de desenvolvimento e as condições meteorológicas locais. Portanto, o manejo da irrigação não pode ser de natureza fixa, conforme frequentemente colocado nos projetos. A flexibilidade necessária exige o monitoramento em tempo real do teor de água do solo.

A quantificação do teor de água no solo por meio de sensores de capacitância está em crescente utilização devido aos seguintes fatores: não são métodos destrutivos, fornecem medidas quase instantâneas (fração de segundos), requerem pouca ou nenhuma manutenção, podem permanecer no solo durante um longo período, são capazes de fornecer leituras contínuas e não é empregada radiação, o que permite medidas exatas próximo à superfície do solo (FREITAS, et al., 2012).

As desvantagens na utilização das sondas dielétricas consistem na necessidade de calibração para garantir medidas exatas do teor de água no solo; sensibilidade ao tipo de solo e outros fatores, como a salinidade e a temperatura (INOUE et al., 2008; KIZITO et al., 2008; KINZLI et al., 2011; KODESOVÁ et al., 2011; MITTELBAACH et al., 2012).

Entre os meios utilizados para determinar a umidade do solo podem ser citadas: medição com sonda de nêutrons, resistência elétrica, tomografia computadorizada com raios X e raios gama, ressonância magnética, a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) (TRINTINALHA et al., 2008).

Visando contribuir com as pesquisas na área de sensores de umidade para sistema de irrigação automatizada e fornecer dados de calibração de sensores de umidade para a região produtiva do Estado de Pernambuco, optou-se por trabalhar com solos de referência no Estado de Pernambuco (RIBEIRO et al., 1999).

Solos de referência compõem um conjunto de classes de solos representativos de determinada região e por esta razão, constituem valioso material de pesquisa em decorrência das informações que podem ser inseridas possibilitando a montagem de um banco de dados a ser utilizado na solução de problemas de manejo de solos semelhantes. Comparativamente ao referencial, esses dados podem também ser usados para estudos dos efeitos do uso do solo sobre suas características químicas e físicas. No Brasil, Pernambuco foi o Estado pioneiro na catalogação de solos de referência (RIBEIRO et al., 1999).

Assim, determinar a curva de calibração de sensores de umidade para solos de referências da Zona da Mata é uma importante ferramenta para agricultores que pretendam trabalhar com esse tipo de sensor, além de contribuir para a determinação de umidade do solo em tempo real. Sobretudo viabiliza as pesquisas e o manejo de irrigação, já que o processo de calibração demanda tempo e custo.

Objetivou-se com esta pesquisa determinar a curva de calibração para os sensores dielétricos ECH₂O modelos EC-5 e 5TE para solos de referência da Zona da Mata de Pernambuco.

CAPÍTULO 1

REVISÃO DE LITERATURA

1.1 Perdas de água em sistema de irrigação por problemas de manejo

Á água é essencial para qualquer ser vivo, tanto para abastecimento doméstico, como para a geração de energia elétrica, irrigação, turismo, piscicultura, pesca entre outros. Com o crescimento da população, aumentou a degradação do ambiente e a expansão do crescimento agrícola, a água doce está cada vez mais escassa. Usar esse recurso natural de forma consciente é primordial para não comprometer as gerações futuras.

O manejo racional da irrigação consiste na aplicação da quantidade necessária de água às plantas no momento correto. Por não adotar um método de controle da irrigação, o produtor rural usualmente irriga em excesso, temendo que a cultura sofra estresse hídrico, o que pode comprometer a produção. Esse excesso tem como consequência o desperdício de energia e de água, usados em bombeamento desnecessário. Segundo Lima et al. (1999) o sistema de irrigação localizada tem eficiência de irrigação de 80 a 95%, enquanto no sistema de irrigação por aspersão é de 60 a 85% e por superfície de 40 a 75%.

Segundo estudo realizado pela Companhia Energética de Minas Gerais CEMIG (1993), se a irrigação fosse utilizada de forma racional, aproximadamente 20% da água e 30% da energia consumidas seriam economizadas, sendo 20% da energia economizada devido à aplicação desnecessária da água e 10% devido ao redimensionamento e otimização dos equipamentos utilizados para a irrigação (COELHO et al., 2005b).

1.2 Determinação de umidade no solo

A umidade do solo é o conteúdo de água que está presente no espaço poroso do solo que são os microporos e os macroporos, a qual é uma propriedade do estado físico do solo que controla ou modula muitos processos físicos, biológicos e químicos. Conhecer e monitorar essa propriedade são de fundamental importância para o manejo da irrigação, uma vez que o crescimento e o desenvolvimento adequado das plantas dependem do teor de água no solo (KITIC e CRNOJEVIC-BENGIN, 2013).

A quantidade de água no solo é representada principalmente de duas diferentes maneiras, seja a base volumétrica (θ) ou a base gravimétrica (U). A medição volumétrica é dada em metro cúbico de água por metro cúbico de solo e a medição gravimétrica em grama de água por grama de solo seco a 105 °C. Ambas estão relacionadas por $\theta = U \times D$ onde D é a densidade do solo. As técnicas de quantificação da umidade do solo são normalmente classificadas como diretas ou indiretas (MANIERI et al., 2007).

1.3 Métodos de determinação direta de umidade no solo

Os métodos diretos envolvem alguma forma de remoção ou separação da água da matriz do solo com a medida direta da água removida, o que pode ser obtido por aquecimento ou pela utilização de solvente ou reação química.

O método de referência padrão para determinar θ em solos é em estufa, normalmente 100 g ou menos, a 105 °C (TOPP e FERRE, 2002). Alternativas a secagem em estufa têm sido sugeridas, tais como microondas (20 g de solo durante 20 minutos) e mais recentemente, um "forno lâmpada" de baixo custo foi proposto Whitaker et al. (2006) para uso por alunos do ensino fundamental e médio que não tenham acesso às estufas em laboratório.

Embora o método gravimétrico apresente boa exatidão, é demorado (24 a 48 h). Outro aspecto é a dificuldade de monitoramento da umidade do solo no mesmo local, devido ao seu caráter destrutivo (não torna possível a determinação da umidade do solo no mesmo ponto). Isto é particularmente desvantajoso em locais com grande heterogeneidade espacial e variação temporal em propriedades do solo (BRULAND e RICHARDSON, 2005). Para rápida determinação do teor de água e monitoramento, métodos indiretos podem ser utilizados e calibrados por meio do método padrão.

1.4 Métodos Indiretos de determinação de umidade no solo

Os métodos indiretos determinam alguma propriedade física ou química relacionada à umidade do solo. Atualmente, os instrumentos mais utilizados são aqueles que relacionam a umidade com as propriedades dielétricas do meio solo-água-ar, como a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) / capacitivos. Ambos têm se destacado nos últimos anos por apresentarem boa exatidão e baixo risco para o operador (TOPP e FERRE, 2002; MANIERI et al., 2007).

Sensores que utilizam propriedades dielétricas para estimar θ incluem diversos métodos, que vão desde a escala da amostra elétrica dos sensores para métodos geofísicos e sensoriamento remoto. A água possui muitas propriedades únicas, das quais é seu permanente momento dipolo, em que ocorre o deslocamento da carga positiva e negativa, devido à posição dos átomos de hidrogênios em relação ao átomo de oxigênio. A molécula da água tem um grande dipolo permanente em comparação com a maioria dos outros materiais naturais.

Como resultado, a água tem uma permissividade dielétrica igual a 80, em que a permissividade relativa (ϵ_r) é adimensional, definida como $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$, sendo ϵ a permissividade do material e ϵ_0 a permissividade do espaço livre. A permissividade de água é muito maior do que a de ar, que é 1, ou da maioria dos minerais do solo que são cerca de 5 (YODER et al., 1998; ROBINSON et al., 2008).

1.4.1 Reflectometria com domínio do tempo (TDR)

TDR é um dos métodos mais usados de determinação do teor de água do solo, pois não apresenta riscos para a saúde do operador, como a sonda de nêutrons. É altamente sensível às variações do teor de água do solo e permite a coleta automática de dados e a automação da irrigação. Por outro lado, tem a desvantagem de apresentar um custo relativamente elevado para ser empregado em área de produtores e de requerer a instalação das guias de onda em trincheiras quando se quer realizar medições em profundidades maiores no perfil do solo (ANDRADE et al., 1998; LACERDA et al., 2005).

Alguns sistemas dispõem de sondas segmentadas, outros empregam tubos de acesso para permitirem a obtenção de dados de teor de água do perfil do solo em uma única posição vertical. Outra desvantagem dos sistemas com sondas segmentadas ou com tubos de acesso é a dificuldade de instalação, que deve ser o mais justa possível no solo para permitir excelente contato da sonda com o solo. Qualquer vazio entre a sonda ou tubo de acesso e o solo causa um enorme erro nas leituras naquele ponto (COELHO et al., 2005b; REZAEI et al., 2012).

1.4.2 Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) – Sensores Capacitivos

Os sensores deste grupo usam um oscilador para gerar um campo de corrente alternada, o qual é aplicado ao solo para detectar mudanças em suas propriedades dielétricas relacionadas a variações do teor de água do solo. Semelhantes ao sistema TDR, eles são

conhecidos como sensores dielétricos. Sensores do tipo capacitivo consistem, essencialmente, de um par de eletrodos ou um conjunto de hastes em paralelo ou anéis de metal, que forma um capacitor com o solo, atuando como um dielétrico. Esse capacitor trabalha com um oscilador para formar um circuito sintonizado. Mudanças no teor de água do solo são detectadas pelas mudanças na frequência de operação (CRUZ et al., 2010).

Sensores no domínio da frequência trabalham similarmente, mas usam uma varredura de frequência. A frequência ressonante (na qual a amplitude é a maior) é uma medida do teor de água do solo, enquanto a amplitude é uma medida da condutividade elétrica do solo. Semelhante aos sensores do tipo capacitivo, as medidas são feitas em uma única frequência, mas a exatidão desta depende do teor de água do solo (KIZITO et al., 2008).

Sensores capacitivos são uma excelente alternativa, por causa de seu baixo custo, além de permitir contínuo monitoramento, recursos de registro de dados, repetibilidade e aplicabilidade a uma gama de tipos de solo, desde que tenha uma calibração específica para cada tipo de solo, uma vez que a sensibilidade para aberturas de ar, salinidade do solo, temperatura, densidade e teor de argila limitam a utilização deste método (KIZITO et al., 2008; BARBOSA et al., 2012).

1.5 A influência da salinidade e temperatura do solo nos sensores

A salinidade e temperatura do solo são fatores que podem influenciar na calibração dos sensores de umidade, dificultando a determinação da umidade do solo (SILVA et al., 2007; ROBINSON et al., 2008; ZHANG et al., 2011).

Por meio de análises laboratoriais e experimento em campo, mostraram que a sensor capacitivo EC-5 era suscetível à temperatura e à salinidade na calibração (KIZITO et al., 2008).

A variabilidade espacial da temperatura do solo foi considerada fraca em relação à salinidade do solo, que mostrou intensidade moderada. Fazendo uma correlação entre variação e custo, quando a exatidão da calibração dos sensores em relação à salinidade e à temperatura do solo for 1,5%, a poupança de custo total é de 44,25%. Para grande escala em terras agrícolas, a exatidão de calibração de conteúdo de água diminui o custo com o maior raio de compartilhamento de informações dos sensores, de modo a reduzir o investimento na produção reduzindo o número de sensores (ZHANG et al., 2011).

Também é possível determinar a umidade volumétrica por meio de medições das variações de temperatura entre dois pontos no solo. Quando um deles recebe um pulso de calor relacionam-se as variações de temperatura medidas com o conteúdo de água no solo. Estudos com diversos tipos de sensores de temperatura com geometrias diferentes vêm sendo utilizados para estimar a umidade volumétrica, como é o caso dos trabalhos que utilizam termistores (HAM e BENSON, 2004).

1.6 Calibração de sensores dielétricos

Em virtude dos sensores que utilizam propriedades dielétricas para estimar a umidade de forma indireta se correlacionar com outras propriedades do solo, é imprescindível a realização de calibrações para os solos a serem monitorados (GONÇALVES et al., 1999).

De acordo com Tommaseli e Bacchi (2001), as curvas ajustadas são mais exatas que as curvas embutidas no equipamento; conseqüentemente a curva de calibração do fabricante é inadequada para a determinação de umidade nos cinco solos estudados em sua pesquisa.

Segundo Miranda et al. (2007), que utilizaram o sensor ECH₂O modelo EC-10 para o Neossolo Quartzarênico, este sensor apresenta uma resposta linear à variação de umidade do solo, representada pela equação $\theta = 0,0009x - 0,2778$, em que θ é a umidade do solo em $m^3 m^{-3}$ e x é o potencial elétrico do sensor ECH₂O em mV, com $r^2 = 0,9899$. Para o Cambissolo a equação de calibração com encontrada foi quadrática $\theta = 8,2890.10^{-6} x^2 - 0,0106 x + 3,5291$, com $r^2 = 0,9475$. As curvas de calibração obtidas para ambos os solos apresentaram valores altos de coeficiente de determinação (r^2), indicando que, quando devidamente calibrado, o sensor pode ser utilizado com bons resultados de forma segura.

O desempenho deste mesmo sensor também foi comprovado por outros autores que mencionam a possibilidade de se obter uma equação com nível de exatidão acima de 97% (DORNELES e RUIVARO, 2012).

O método de calibração em laboratório fornece aos pesquisadores equações exatas. Em estudo com o sensor de capacitância EC-20, Kinzli et al. (2011) determinaram 16 equações de calibrações para vários solos. Além disso, com o uso de sensores de umidade do solo calibrados em laboratório, viabiliza programar precisamente eventos de irrigação com base em necessidades hídricas das culturas, o que pode reduzir o uso da água em até 30% (OAD e KULLMAN, 2006; OAD et al., 2009).

Os pesquisadores Kodesavá et al. (2011) utilizaram os sensores ECH₂O EC-5 e SM200 para medir o teor de água do solo. Ambos os sensores foram sensíveis à pequena mudança de água testada neste estudo. Para calibração do sensor EC-5 foi utilizada análise de regressão linear múltipla, observando-se que o sensor foi sensível à variação da densidade, fração de areia e salinidade inicial do solo, nos quatros solos estudados.

CAPÍTULO 2

MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de ocorrência dos solos estudados

A Zona da Mata de Pernambuco é composta por 43 municípios, ocupando uma área de 8.738 km², correspondente a 8,9% do território estadual, situada entre os meridianos de 34°80' e 30°20' Oeste de Greenwich e os paralelos 8°20' e 9°00' Sul, com razoável infraestrutura econômica (estradas, portos marítimos, aeroportos). É uma das regiões de maior potencial econômico do Nordeste, pelos recursos naturais disponíveis (água, solo etc.), pelas vantagens locacionais em torno da Região Metropolitana do Recife. A sua população de 1.132.544 habitantes, equivale a 15,9% da população do estado, dos quais 62% se encontram na zona urbana. Nessa Região concentram a monocultura canavieira em uma área de aproximadamente 450 mil hectares. De clima úmido e com vegetação natural do tipo floresta tropical chuvosa, essa Zona apresenta duas porções distintas: uma Meridional mais chuvosa, e outra Setentrional menos úmida, com estação seca mais pronunciada. Na Zona da Mata foram catalogados 35 perfis de solos de referência como ilustrado na Figura 01, das quais foram selecionados quatro classes desses solos Argissolo Amarelo, Espodossolo Humilúvico, Latossolo Amarelo e Argissolo Vermelho-Amarelo para as avaliações da presente pesquisa.



FIGURA 1- Localização dos perfis de solos de referência do Estado de Pernambuco.
Fonte: <http://www.colecaomateusrosas.com.br>

2.2 Caracterização dos solos estudados

2.2.1 Solo 1 – Argissolo Amarelo

Este solo está situado em uma floresta tropical e possui textura média/argilosa e relevo plano. Localiza-se na rodovia PE 062 Km 19, no município Aliança/PE, coordenadas 07° 36' 30'' S e 35° 08' 43'' WGr. Este solo pertence à ordem dos Argissolos, que são caracterizados pela presença de horizonte B textural de cor amarelada, com argila de atividade baixa, saturação por bases baixa e presença do caráter coeso.

Estes solos estão distribuídos em associações com os Latossolos Amarelos, Argissolos Amarelos e Espodossolos, nos tabuleiros terciários da zona úmida costeira do litoral oriental do Nordeste. Em Pernambuco ocorrem nos tabuleiros ao Norte da cidade do Recife e ocupam áreas dos municípios de Araçoiaba, Igarassu, Abreu e Lima, Goiana e Cruz de Rebouças (RIBEIRO et al., 1999).

A região apresenta altitude de 50 a 100 metros e o clima é do tipo tropical chuvoso com verão seco. O período chuvoso começa no outono tendo início em fevereiro e término em outubro. A precipitação média anual é de 1.634 mm. A vegetação é predominantemente do tipo Floresta Subperenifólia, com partes de Floresta Subcaducifólia e cerrado/floresta (MASCARENHAS et al., 2005).

2.2.2 Solo 2 – Espodossolo Humilúvico

Está localizado no município Goiana, com as seguintes coordenadas 07° 38' 41'' S e 34° 56' 44'' W. Este solo pertence à ordem dos Espodossolo, que são caracterizados pela presença de horizonte B espódico subjacente a horizonte eluvial. Este subgrupo apresenta um B espódico de concentração predominante de matéria orgânica e textura arenosa até profundidade maior que 100 cm, apresentando cimentação em profundidade de caráter dúrico (RIBEIRO et al., 1999).

A distribuição geográfica destes solos está relacionada com a região do litoral e mata, ocupando estreitas faixas na baixada litorânea, próximas da orla marítima ou em maior extensão, nos tabuleiros costeiros da Mata Norte, municípios de Igarassu, Araçoiaba, Abreu e Lima, Cruz de Rebouças e Goiana (RIBEIRO et al., 1999).

2.2.3 Solo 3 – Latossolo Amarelo

Possui textura argilosa, fase floresta tropical, relevo plano. Localizado no município de Rio Formoso do estado de Pernambuco cujas coordenadas do perfil do solo são 08° 38' 39'' S. e 35° 09' 15'' W (RIBEIRO et al., 1999).

Este solo pertence à ordem dos Latossolos, que compreende solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte diagnóstico superficial. São solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo. Nos Latossolos Amarelos, a fração de argila é de natureza essencialmente caulínica.

No Estado de Pernambuco têm importante ocorrência na Zona Úmida Costeira, associados com os sedimentos da Formação Barreiras, na microrregião da Mata Norte, com áreas mais contínuas nos municípios de Igarassu e Araçoiaba (RIBEIRO et. al., 1999).

2.2.4 Solo 4 – Argissolo Vermelho-Amarelo

Este solo localiza-se em floresta de várzea, com relevo plano e textura média/argilosa. Situa-se na sede da Estação experimental do IPA, no município de Itambé (PE), coordenadas (UTM) latitude 0259909 e longitude 9181299.

Este solo pertence à ordem dos Argissolos, e são caracterizados pela presença de B textural de cor amarelada, com argila de atividade baixa, saturação por bases baixa e presença do caráter coeso. São transicionais para Latossolos.

Estão distribuídos em associações com os Latossolos Amarelos, Argissolos Amarelos e Espodossolos, nos tabuleiros terciários da zona úmida costeira do litoral oriental do Nordeste. No estado de Pernambuco ocorrem nos tabuleiros ao Norte da cidade do Recife, ocupando áreas dos municípios de Igarassu, Araçoiaba, Abreu e Lima, Cruz de Rebouças e Goiana (RIBEIRO et al., 1999).

2.3 Características dos sensores de umidade do solo

Os sensores de umidade do solo utilizados foram do tipo capacitivo ECH₂O, modelos EC-5 e 5TE (Decagon Devices™). O modelo EC-5 tem dimensões de 8,9 cm de comprimento, 1,8 cm de largura e 0,7 cm de espessura, possui o formato de garfo com duas

hastes (Figura 2a) e determina o conteúdo volumétrico de água (CVA) medindo umidade volumétrica do meio utilizando a tecnologia de reflectometria de domínio de frequência. Sua frequência de 70 MHz minimiza os efeitos de textura e salinidade. O outro modelo, o 5TE, possui um formato de garfo com três hastes de pontas finas (Figura 2b), em que no centro das mesmas há um parafuso responsável por emitir frequências em ondas de 70 MHz, com dimensões de 10 cm de comprimento, 3,2 cm de largura e 0,7 cm de espessura. Este sensor monitora o teor de sais no sistema, por meio da condutividade elétrica, além de aferir a umidade volumétrica e a temperatura do solo. O 5TE mede a temperatura com um termistor onboard e a condutividade elétrica usando um conjunto de eletrodos de aço inoxidável. Segundo o fabricante, a temperatura do sensor 5TE foi calibrada na fábrica para todos os tipos de solos. Estes sensores são instalados a um datalogger EM50 (Decagon Devices™) (Figura 2c).

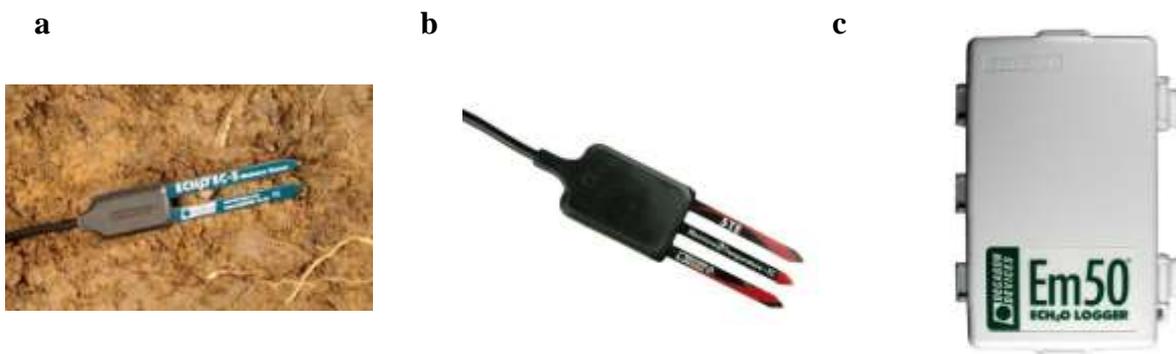


FIGURA 2- Fotos dos instrumentos utilizados neste estudo. Sensor EC-5 (a); Sensor 5TE (b); datalogger (c)
Fonte: <<http://www.decagon.com>>

2.4 Amostragem dos solos e preparo das amostras

Amostras com estrutura deformada de cada tipo de solo foram coletadas na profundidade de 0 a 40 cm. As amostras foram colocadas em sacos plásticos devidamente identificados. Também foram coletadas amostras com estrutura não deformada com o uso de anel volumétrico tipo Uhland para determinar a densidade do solo. No laboratório, as amostras com estrutura deformada foram secas ao ar, destorroadas e passadas em uma peneira com malha de 4,75 mm para a retirada de raízes e torrões. As amostras foram colocadas em seis vasos com 4,66 L de volume útil. O fundo dos vasos foi perfurado e coberto com brita e bidim, a fim de permitir a drenagem do excesso de água, evitando-se perdas de solo. O conjunto vaso, brita e bidim foi pesado para ser subtraído do peso do solo.

Na montagem do experimento foram mantidas as respectivas densidades dos solos no campo dentro dos vasos. Utilizaram-se seis vasos iguais, porém com forma irregular. Eles possuem três anéis (Figura 3), o anel inferior de menor volume, o anel central volume útil e o anel superior. Para medir o volume do vaso, por apresentar forma irregular, foi adicionada água no primeiro anel e depois pesado. A balança foi tarada e adicionada água até o volume útil do vaso e pesado novamente para conhecer seu volume útil. Foram desconsiderados o anel inferior, que foi ocupado pela brita, e o anel superior do vaso.

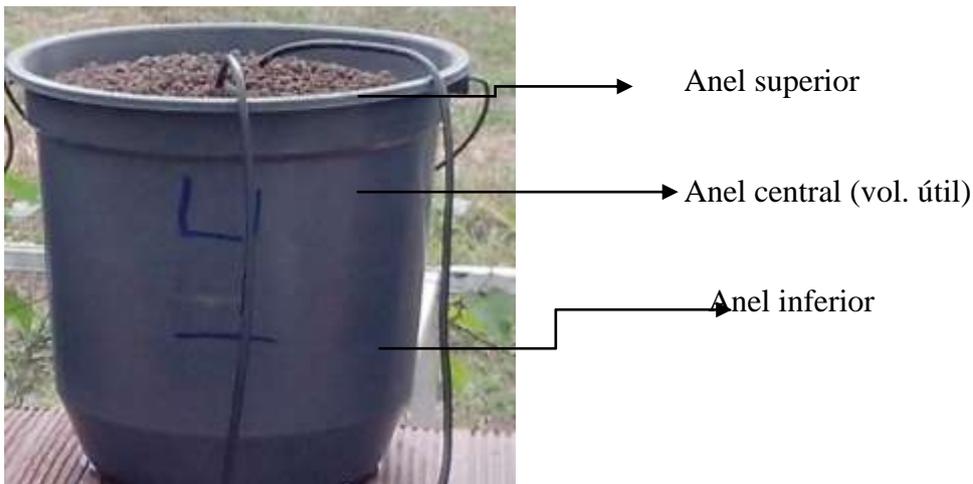


FIGURA 3 - Representação do vaso na montagem do experimento.

2.5 Determinação das propriedades físico-hídricas dos solos

As análises foram conduzidas no Laboratório de Física de Solos, do Departamento de Agronomia na UFRPE, Campus Dois Irmãos, Recife-PE. A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (Equação 1) e torrão parafinado (Equações 2, 3 e 4), conforme a estrutura do solo permitiu, seguindo a metodologia recomendada pela EMBRAPA (1997).

$$D = \frac{M_s}{V_t} \quad \text{Equação (1)}$$

D = densidade do solo, g.cm^{-3}

M_s = massa do solo seco, g

V_t = volume total, cm^3

$$\text{Peso do torrão a } 105 \text{ }^{\circ}\text{C} = \frac{a}{[1+(b/100)]}, \text{ g} \quad \text{Equação (2)}$$

a = peso do torrão úmido, g

b = % de umidade da subamostra

$$\text{Volume do torrão} = [(a - b) - c], \text{ cm}^3 \quad \text{Equação (3)}$$

a = peso do torrão parafinado, g

b = peso do torrão parafinado mergulhado em água, g

c = volume da parafina = peso da parafina / 0,90, cm³

$$\text{Densidade} = \frac{a}{b}, \text{ g/cm}^3 \quad \text{Equação (4)}$$

a = peso do torrão seco a 105 °C, g

b = volume do torrão, cm³

2.6 Caracterização física dos solos estudados

Na Tabela 1 está apresentada a caracterização física dos solos estudados, a qual consta no relatório de caracterização dos solos de referência do Estado de Pernambuco, realizado por Ribeiro et al., (1999). Entre eles estão os solos em estudos: Espodossolo Humilúvico (EK), Argissolo Amarelo (PA), Latossolo Amarelo (LA) e o Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA).

TABELA 1- Caracterização física dos solos estudados (RIBEIRO et al., 1999)

Características	Espodossolo 15-46 cm	Argissolo Amarelo 0- 28 cm	Latossolo 10-24 cm	Argissolo Vermelho-Amarelo 0-35 cm
Dens. de partículas (t m ⁻³)	2,67	2,74	2,63	2,51
Dens. do solo (t m ⁻³)	1,87	1,51	1,38	1,40
Porosidade total (%)	30	45	48	44
Areia grossa (g kg ⁻¹)	664	500	306	470
Areia fina (g kg ⁻¹)	257	292	182	140
Silte (g kg ⁻¹)	34	73	44	170
Argila (g kg ⁻¹)	45	135	468	220

2.7 Cálculo da massa de solo no vaso

Para medir a massa do solo úmido a ser colocada no vaso, pesou-se uma amostra de aproximadamente 50 g de massa úmida e a levou para estufa a 105 °C por 24 h, para conhecer a umidade gravimétrica (Equação 5). Em seguida foi determinado o fator de correção (F), por meio da razão da terra fina seca ao ar (TFSA) com terra fina seca em estufa (TFSE) (Equação 6). A massa úmida foi determinada multiplicando-se a densidade do solo, determinada nas amostras de estrutura não deformada (Tabela 2), pelo volume útil do vaso e pelo fator (F) (Equação 7).

$$U = 100 \frac{(msu - mss)}{mss} \quad \text{Equação (5)}$$

U = umidade gravimétrica, %

msu = massa do solo úmido, g

mss = massa do solo seco, g

$$F = \frac{TFSA}{TFSE} \quad \text{Equação (6)}$$

TABELA 2- Densidade calculada dos solos estudados

Solo	Densidade (g cm ⁻³)
Espodossolo	1,52
Argissolo Amarelo	1,59
Latossolo	1,41
Argissolo Vermelho-Amarelo	1,52

$$\theta = U \times D \times F$$

Equação (7)

θ = umidade volumétrica, cm³ cm⁻³

U = umidade gravimétrica, g g⁻¹

D = densidade do solo, g cm⁻³

2.8 Instalação e calibração dos sensores

No experimento, foram utilizados seis vasos para a calibração dos sensores, dos quais, em quatro vasos foram instalados dois sensores de umidade ECH₂O, um de modelo EC-5 e o outro 5TE, nos outros dois vasos foram instalados apenas um sensor EC-5. Os sensores foram instalados verticalmente, mantendo 0,05m de raio de solo das paredes do vaso, conforme recomendado pelo fabricante, e na mesma profundidade (0,05 m abaixo da superfície do solo). Foi realizada uma leve compressão lateral do solo contra os sensores com o auxílio de uma espátula, a fim de melhorar o contato entre o solo e os sensores, seguindo as recomendações de instalação do fabricante.

Posteriormente, foi realizada a saturação do solo por meio da elevação gradual de uma lâmina de água. Depois de atingida a saturação, os mesmos foram colocados em uma bancada a fim de permitir a drenagem do excesso de água e iniciar o processo de secagem por evaporação natural (Figura 4).



FIGURA 4 - Saturação do solo por elevação gradual.

Os conjuntos (vasos, solo, brita, bidim e sensores) foram colocados sobre uma bancada (Figura 5) na casa de vegetação e pesados três vezes ao dia, em horário fixo (8, 12 e 16h) durante aproximadamente 30 dias, ou até que as variações diárias de massa se tornassem constantes nas pesagens. Para tanto, utilizou-se uma balança eletrônica, com precisão de ± 2 g. Durante esse período foram realizadas leituras horárias da umidade volumétrica de resposta dos sensores de umidade ECH₂O (em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), utilizando estações de coleta de dados Em50.

O software ECH₂O Utility, que acompanha o Em50, permite ao usuário selecionar a unidade de saída das leituras dos sensores ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, mV, %, cm m^{-1}). Neste trabalho optou-se por $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, o que representa a umidade volumétrica medida pelo sensor com base na equação de calibração do fabricante.



FIGURA 5 - Conjunto solo, vaso e sensores na bancada na casa de vegetação.

Após o término das pesagens e das leituras de umidade, retirou-se uma amostra de solo de cada vaso que após secar em estufa a 105 °C por 24 h foi utilizada para determinação da massa de solo seco. A massa de água presente no solo em cada pesagem foi determinada pela diferença entre as leituras diárias da balança, descontando a massa do conjunto (vaso, brita, bidim e sensores) e a massa do solo seco.

A umidade gravimétrica foi determinada pela relação entre a massa de água presente no solo e a massa do solo seco. A umidade volumétrica foi determinada pela multiplicação da umidade gravimétrica pela densidade de cada solo.

2.9 Análises estatísticas

A análise de regressão foi utilizada para relacionar o conjunto de pares de valores individuais de duas variáveis quantitativas (X e Y). Deste modo, a relação entre as duas pode ser representada em termos de uma equação, que no caso deste estudo, trata-se da equação de calibração do sensor para este tipo de solo. As funções matemáticas descritas neste estudo expressaram a relação entre as variáveis: 1) resposta do sensor de umidade, em termos de umidade volumétrica, em $m^3 m^{-3}$ (variável independente ou preditora X) e 2) umidade do solo à base de volume ou θ , em $m^3 m^{-3}$ (variável dependente ou resposta Y).

A representação gráfica utilizada foi dispersão para representar a relação entre as variáveis estudadas. Com estes dados foram obtidos os coeficientes (a, b) das equações de regressão linear dos sensores nas condições deste estudo.

A análise de variância e o teste F foram realizados para se determinar a significância da relação entre as variáveis utilizadas nos modelos lineares, ao nível de 5% de probabilidade.

Índices estatísticos foram utilizados para avaliar a qualidade do ajuste. Assim, foram determinados o coeficiente de correlação (r), raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e o grau de variabilidade estimado pelo coeficiente de variação (CV) dos atributos, conforme sugerido por Warrick e Nielsen (1980) que consideram baixa variabilidade quando $CV < 12\%$; média para o intervalo 12-60% e alta variabilidade quando $CV > 60\%$.

Para validação dos modelos, foram utilizados o índice “d” de Willmott (1981) e o coeficiente de desempenho (c), proposto por Carmargo e Sentelhas (1997), conforme apresentado na Tabela 3. O índice de concordância d, varia de 0 a 1, em que o valor 1

significa uma concordância perfeita entre os dados medidos e estimados, enquanto o valor 0 significa não haver concordância entre os valores analisados.

Segundo Carmargo e Sentelhas (1997) o coeficiente de correlação (r) indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, e o grau de exatidão (d) está associado ao desvio entre valores estimados e medidos (Equação 8). Assim, o produto entre “r” e “d” resulta no coeficiente de desempenho (c).

$$d = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad \text{Equação (8)}$$

d = índice de Willmott

P_i = valores de umidade medida, m³ m⁻³

O_i = valor da umidade estimada pelo sensor, m³ m⁻³

O = umidade média estimada pelo sensor, m³ m⁻³

TABELA 3- Valores dos índices de desempenho conforme Carmargo e Sentelhas (1997)

Valor de “C”	Desempenho
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
< 0,30	Péssimo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 6 estão apresentadas as curvas de secagem natural geradas tanto com dados medidos por meio das pesagens, como também com os valores das leituras dos sensores EC-5 e o 5TE, de acordo com o número de observações correspondentes de cada solo.

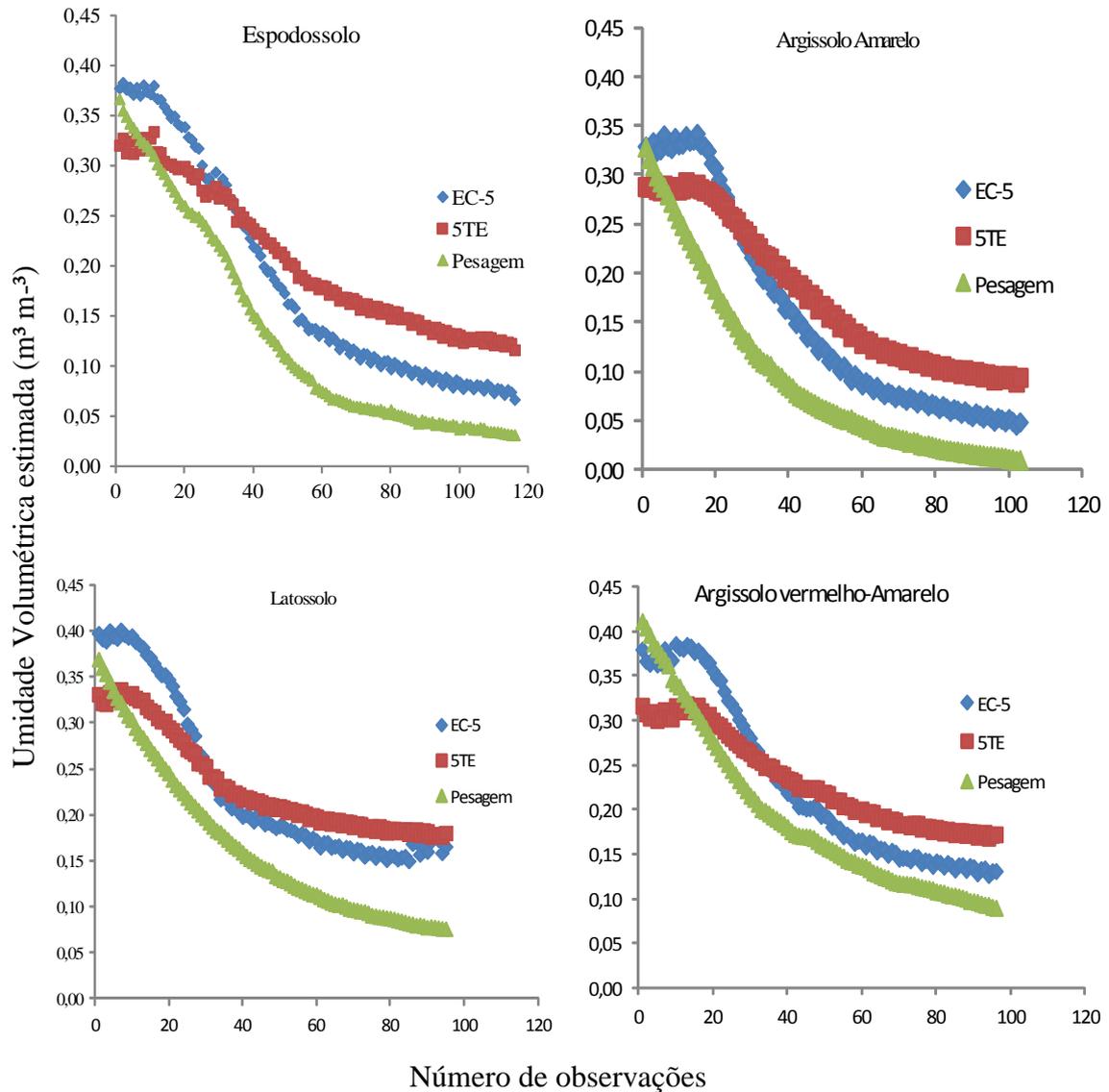


FIGURA 6. Curvas de secagem dos solos conforme valores de umidade medidos pelos sensores EC-5 e 5TE, segundo a calibração do fabricante e conforme a umidade obtida por pesagem.

No Espodossolo (EK) foram 116 observações, no Argissolo Amarelo (PA) 103, no Latossolo (LA) 95 e no Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) 96 observações. O número de

observações variou de acordo com tempo necessário para obter valores de pesagem constantes para cada solo, conforme a evaporação natural da água do solo e pelas próprias características físicas de cada solo. Constatou-se que as leituras dos sensores tem uma correlação com a secagem natural, representada no gráfico e medida por meio de pesagens. Com os valores da umidade gravimétrica foi calculada a umidade volumétrica. Observa-se que, quando a umidade encontra-se na faixa de 30 a 40% os sensores foram menos sensíveis à variação de umidade comparando com os valores obtidos nas pesagens.

Nas curvas geradas com os dados das pesagens, a curva de inclinação apresenta claramente a perda de umidade no decorrer das pesagens, enquanto que as curvas oriundas das leituras dos sensores EC-5 e o 5TE quase não ocorreu variação de umidade nas primeiras leituras. A sensibilidade de leitura dos sensores aumentou à medida que o conteúdo de água no solo reduziu. Comportamento similar foi observado por Cruz et al., (2010) que trabalhou com sensor capacitivo em solo arenoso. Soto et al. (2007) analisaram a curva de secagem por sucção matricial, desde a saturação até 7% de umidade e utilizaram o sensor TDR para medir o percentual de umidade no solo. Os autores observaram que o solo tende a apresentar uma uniformidade na perda de umidade na faixa de 10 a 1000 kPa, ou seja, a baixo de 10% de umidade. Esse fato também pode ser observado na Figura 6.

Na Tabela 4 estão os valores de amplitude do teor de água das amostras nos solos estudados, no início da secagem (I) e ao final da secagem (F).

TABELA 4. Amplitude de valores do teor de água das amostras de solo.

Solos	Sensores			
	EC-5		5TE	
	I	F	I	F
ES	0,3773±0,0346	0,0668±0,0194	0,3204±0,0117	0,1162±0,0275
AA	0,3299±0,0377	0,0492±0,0166	0,2888±0,0137	0,0947±0,0206
LA	0,3977±0,0261	0,1657±0,0386	0,3312±0,0322	0,1803±0,0256
AV	0,3799±0,0140	0,1311±0,0107	0,3167±0,0269	0,3167±0,0100
Solos	U		θ	
	I	F	I	F
	ES	0,2381±0,0077	0,0204±0,0044	0,3662 ± 0,0119
AA	0,2019±0,0057	0,0065±0,0020	0,3290 ± 0,0092	0,0107 ± 0,0037
LA	0,2455±0,0052	0,0506±0,0067	0,3694 ± 0,0078	0,1659 ± 0,0101
AV	0,2659±0,0111	0,0580±0,0084	0,4116 ± 0,0171	0,0899 ± 0,0130

Umidade volumétrica no início (I) da secagem e no final (F) da secagem do sensor EC-5 e 5TE em ($m^3 m^{-3}$); umidade gravimétrica (U) em ($kg kg^{-1}$); umidade volumétrica medida (θ) em ($m^3 m^{-3}$)

Embora a técnica de determinação da umidade do solo tenha sido aplicada para todos os solos, pode-se observar certa variação nos valores da umidade no início da secagem e no final da secagem, em todos os solos. Este fato pode ser associado à influência das características físicas do solo, como textura, densidade e porosidade (KIZITO et al., 2008; MITTELBACH et al., 2012). Também podemos observar uma forte correlação entre o valor da umidade inicial do sensor EC-5 e o valor inicial da umidade volumétrica medida.

O conteúdo volumétrico de água medido e a umidade estimada pelo sensor ECH₂O modelo EC-5 e o modelo de regressão linear são apresentados na Figura 7 para todos os solos. Assim como, as equações que definem as curvas de calibrações do EC-5 e o respectivo coeficiente de determinação (r^2), onde y é a umidade do solo em m^3m^{-3} e x é a umidade volumétrica do sensor ECH₂O em m^3m^{-3} .

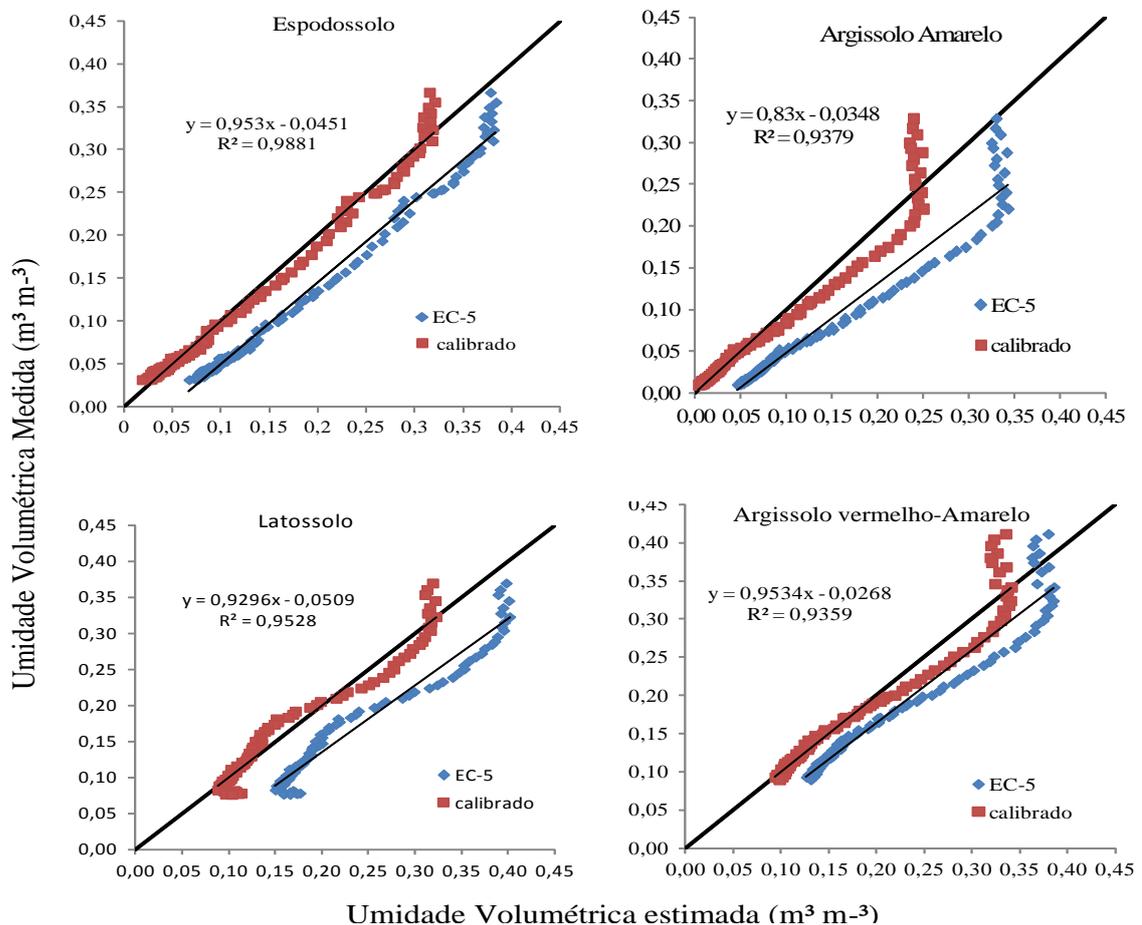


FIGURA 7 - Conteúdo volumétrico de água medido e estimado sem calibração e com calibração.

Os resultados obtidos com o sensor EC-5 subestimaram a umidade em todos os solos estudados e ao longo de toda a faixa de umidade. Quanto mais úmido o solo, maior a variação apresentada pela técnica, ou seja, maior o desvio entre o valor de umidade medido e o estimado pelo sensor, o que poderia induzir o agricultor aplicar mais água do que realmente é necessário. Esse resultado, de certa forma, já era esperando visto que Miranda (2007), trabalhou em sua pesquisa com o modelo EC-10 do mesmo fabricante, também obteve dados subestimados pela curva calibração do fabricante. Os valores da umidade volumétrica calculada apresentaram baixo CV para todos os solos, conforme Warrick e Nielsen (1980), indicando uniformidade nas pesagens. Seus respectivos valores foram CV = 11,4% (EK), CV = 10,23% (PA), CV = 5,58% (LA) e CV = 8,10% (PVA).

Como pode ser observado na Figura 7, a calibração promoveu a aproximação dos valores estimados pelo sensor dos valores medidos pela pesagem, em toda a faixa de umidade. Ainda na Figura 7, observa-se que a baixa sensibilidade do sensor na faixa de umidade mais elevada, uma vez que no EK a umidade volumétrica medida reduziu de aproximadamente 37% para 30% enquanto que a umidade volumétrica estimada pelo sensor permaneceu em aproximadamente 30%, o mesmo ocorreu com o AA que obteve quando a umidade volumétrica medida reduziu de aproximadamente, 33% para 20% e a estimada não variou de 24%; da mesma forma no LA a umidade volumétrica medida registrou redução de, aproximadamente, 37% à 30% e a umidade estimada permaneceu em 32% e, finalmente, no PVA este fato ocorreu quando a faixa de redução foi de 42% à 33% para a umidade volumétrica medida, enquanto que a umidade volumétrica medida do sensor EC-5 marcava 34% de umidade.

Na Tabela 5 estão apresentados os valores da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), entre os valores medidos e estimados pelo sensor EC-5, antes e depois da calibração. Pode-se observar que a equação de calibração específica, permitiu uma redução significativa nos valores deste índice estatístico. Os valores do RMSE servem para avaliar a extensão de quanto os dados reais variam da curva de ajuste. Para cada ponto na curva, a fórmula do RMSE calcula a diferença entre o valor real do ponto e seu respectivo valor na melhor curva ajustada. Dessa forma, pode-se afirmar que a calibração diminuiu o erro.

TABELA 5 - Valores do RMSE antes de depois da calibração do EC-5

Solo	RMSE antes da calibração	RMSE após a calibração
EK	0,0552	0,0112
PA	0,0678	0,0223
LA	0,0672	0,0173
PVA	0,0402	0,0208

Na Tabela 6 estão apresentados os valores de variação do modelo de regressão linear pela abordagem do quadro de análise de variância, elaborado a partir da partição da soma de quadrados (SQ) e do número de graus de liberdade (GL).

Avaliou-se a significância do modelo gerado entre a umidade volumétrica medida e os valores calibrados do sensor EC-5, a partir do teste F, assumindo um nível de significância de 95%. Devido o valor de F calculado, do modelo, ter sido superior ao valor tabelado $F_{tab} = 3,9146$ para EK, $F_{tab} = 3,8973$ para PA, $F_{tab} = 3,8866$ para LA, $F_{tab} = 3,8880$ para PVA, indicando que as variáveis independentes x (umidades volumétricas estimadas pelo sensor) apresentam relações estatisticamente significativas com as variáveis dependentes y (umidades volumétricas calculadas) sendo rejeitada a hipótese de nulidade.

Todos os parâmetros da equação de calibração do sensor são significativos ($P < 0,05$) para todos os solos estudados. Miranda et al. (2007) avaliaram os parâmetros de calibração do sensor de umidade pela regressão a 1% probabilidade. Freitas et al. (2012) avaliaram os parâmetros de manejo de irrigação, utilizando sensor capacitivos para medida de umidade, com a análise de variância a 5% de probabilidade, cujo solo estudado foi Latossolo Vermelho. Ambos utilizaram análise de variância para validação do experimento e encontraram diferenças significativas entre as variáveis.

TABELA 6 - Análise de variância dos modelos lineares ajustados entre os valores medidos de θ em função dos valores estimados pelo sensor EC-5

	FV	GL	SQ	QM	F	F significação
Espodossolo	Regressão	1	1,2107	1,2107	9473,2644	$1,4523 \cdot 10^{-111}$
	Resíduo	114	0,0146	0,0001		
	Total	115	1,2252			
Argissolo Amarelo	Regressão	1	0,7705	0,705	1525,3111	$9,2213 \cdot 10^{-63}$
	Resíduo	101	0,0510	0,0005		
	Total	102	0,8215			
Latossolo	Regressão	1	0,7360	0,7360	1372,1953	$7,1497 \cdot 10^{-58}$
	Resíduo	94	0,0504	0,0005		
	Total	95	0,7864			
Argissolo Vermelho Amarelo	Regressão	1	0,6263	0,6263	1878,9878	$1,7709 \cdot 10^{-63}$
	Resíduo	93	0,0310	0,0003		
	Total	94	0,6573			

FV- fontes de variação;
 GL - número de graus de liberdade;
 SQ - soma de quadrados;
 QM - quadrado médio;
 F - coeficiente calculado pela distribuição;
 F significação - nível de significância a 5%

Os valores médios de umidade volumétrica e os valores estimados de respostas dos sensores 5TE são apresentados na Figura 8. Assim como, as equações que definem as curvas de calibrações do 5TE e os respectivos coeficientes de determinação (r^2), em que y é a umidade do solo em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e x é a umidade volumétrica do sensor ECH_2O em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

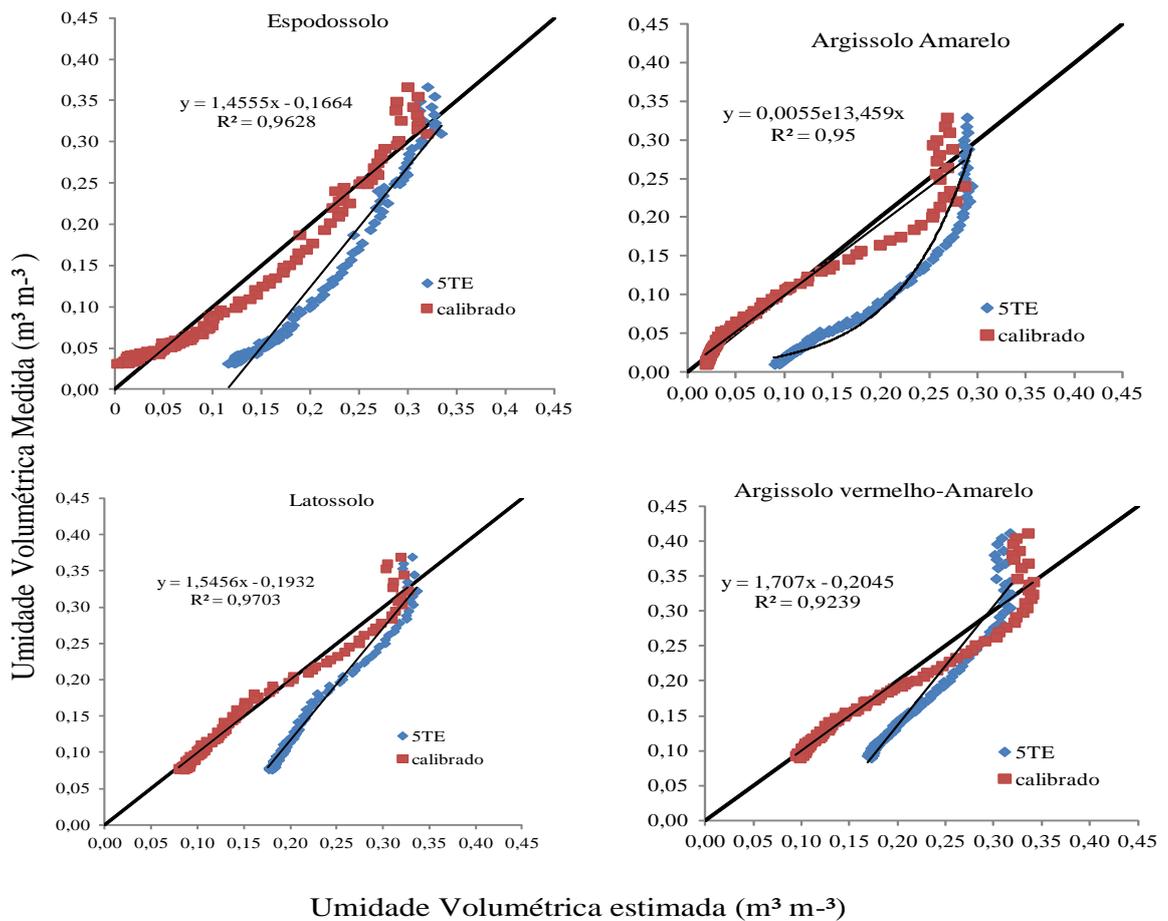


FIGURA 8 - Conteúdo volumétrico de água medido e estimado pelo sensor 5TE com e sem calibração.

Este sensor, também apresentou resposta linear à variação da umidade volumétrica do solo para três solos o EK, o LA e o PVA. Já para o PA a equação que melhor se ajustou foi a exponencial. Conforme apresentado na Figura 8, os valores de umidade do solo segundo a curva do fabricante subestima os valores de umidade reais em praticamente todas as faixas de umidade nos solos estudados. Diferentemente do sensor EC-5, quanto mais seco o solo, maior a variação apresentada pela técnica, ou seja, maior a diferença entre a curva de calibração do fabricante e a curva calibração ajustada. Para o manejo de irrigação isso significa que a curva de calibração específica para os solos estudados reduz o consumo de água, já que a curva do fabricante indica uma quantidade menor de água no solo.

Similarmente ao comportamento do sensor EC-5, o 5TE também apresentou baixa sensibilidade ao ler valores de umidade mais elevados. Assim, pode-se observar na Figura 8 sua baixa sensibilidade na faixa de umidade mais elevada, como no EK quando a umidade volumétrica medida reduziu, aproximadamente de 37% para 31%, a umidade volumétrica

estimada pelo sensor permaneceu em aproximadamente 27%, o mesmo ocorreu com o AA que a umidade volumétrica medida mostrou uma redução de aproximadamente 34% para 24%, enquanto que a umidade estimada permaneceu em torno de 25%; similarmente no LA na faixa de variação de umidade volumétrica medida entre 37% a 24%, a umidade estimada estagnou em 30% e no PVA a umidade volumétrica medida mostrou uma redução de aproximadamente 42% à 30% e a umidade volumétrica medida pelo sensor 5TE registrou 32%.

A validação do modelo foi comprovada pelo índice de Willmott (1981) que resultou em $d = 0,9973$ para EK, $d = 0,9879$ para PA, $d = 0,9903$ para LA, $d = 0,9846$ para PVA, valores estes muito próximos a 1, que é considerado uma ótima concordância entre os valores medidos nas pesagens e os estimados pelo sensor. Assim como, os coeficientes de desempenho (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997) foram de $c = 0,9913$ para EK, $c = 0,9568$ para PA, $c = 0,9667$ para LA, $c = 0,9525$ para PVA, que são classificados como ótimos, pois tem valores $> 0,90$.

Na Tabela 7 estão apresentados os valores do RMSE, entre os valores medidos e estimados pelo sensor 5TE, antes e depois da calibração. Pode-se observar que a equação de calibração específica, permitiu uma redução significativa nos valores deste índice estatístico, os quais são considerados erros baixos entre os valores medidos e estimados pelo sensor. Conforme Miranda et al., (2007) que em estudo, consideraram erro baixo dos valores do RMSE = 0,0083 na calibração do Neossolo e RMSE = 0,054 na calibração do Cambissolo.

TABELA 7 - Valores do RMSE antes de depois da calibração do 5TE

Solo	RMSE antes da calibração	RMSE após a calibração
EK	0,0821	0,0198
PA	0,0873	0,0207
LA	0,0709	0,0138
PVA	0,0544	0,0227

Richard, (1954) estabelece o valor de 4 dSm^{-1} como limite entre solo salino e não salino. As leituras de condutividade elétrica realizadas pelo sensor 5TE indicaram que os solos não são classificados como salinos, pois apresentam valores médios de 0,03 mS/cm para o EK, 0,020 mS/cm para o PA, 0,11 mS/cm para o LA, 0,03 mS/cm para o PVA. Coelho et al., (2005b) concluíram que a condutividade elétrica estimada por sensores de TDR variou

linear e positivamente com a temperatura, sendo que suas variações foram mais sensíveis às variações da temperatura, para maiores valores de umidade.

Os valores das temperaturas medidas ao longo do experimento estão apresentados na Figura 10, em que se pode observar suas variações de 20,3 a 34,8°C para o EK, 24,4 a 37,4°C para o PA, 23,8 a 35,2°C para o LA, 24,2 a 36,6°C para o PVA. Os maiores valores ocorreram nos horários entre 12 e 16h. Zhang et al. (2011) comprovaram que o sinal de saída de sensores capacitivos EC-5 pode ser afetado negativamente pela temperatura, causando erro de leitura de umidade e da salinidade do solo, o que compromete a precisão do equipamento. Conseqüentemente, para grande extensão de área agrícola, a precisão de calibração dos sensores de umidade diminui o custo de instalação já que terá um maior alcance de informações compartilhadas pelo sensor.

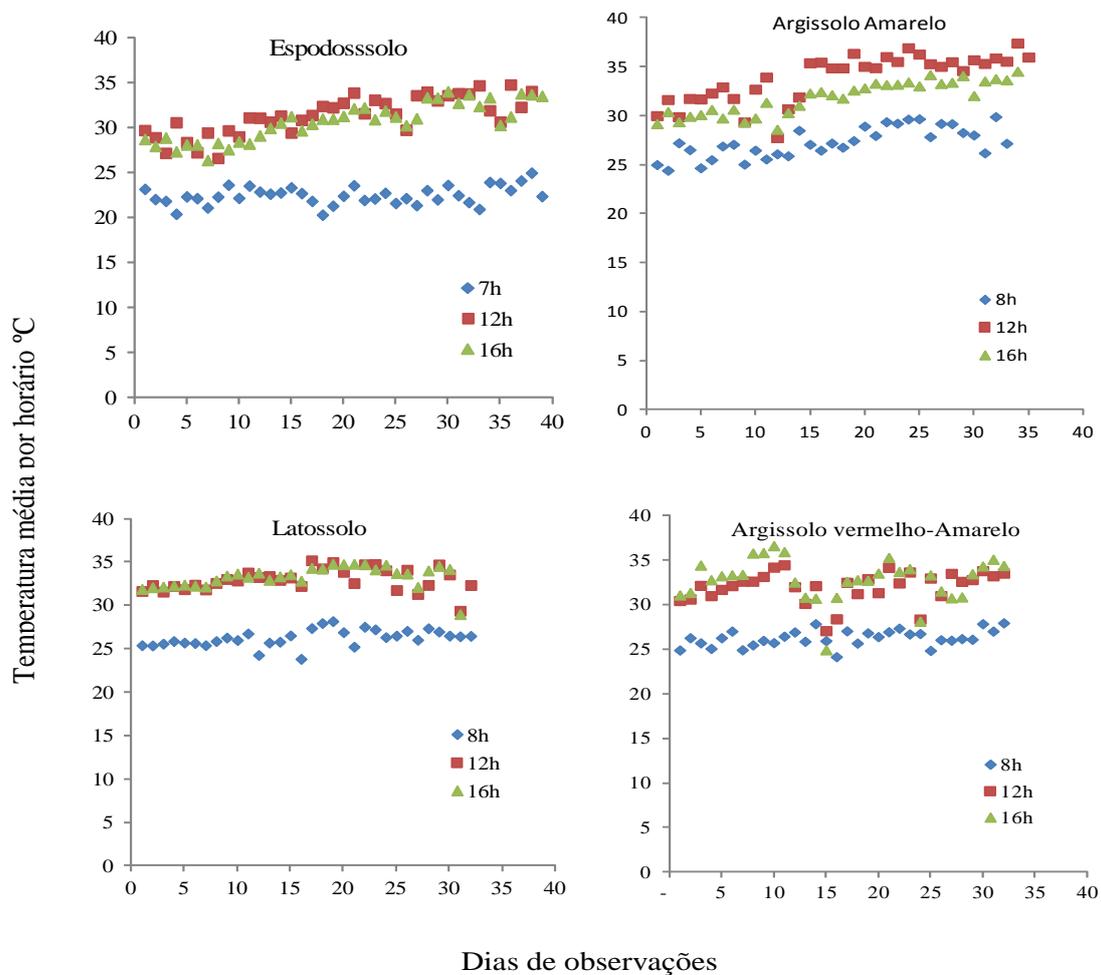


FIGURA 9 - Temperatura no solo medida nos horários de pesagens durante o experimento

Na Tabela 8, estão apresentados os valores da análise de variância do modelo de regressão linear para os solos estudados, em que se avaliou a significância da umidade volumétrica medida e os valores estimados pelo sensor 5TE calibrado, a partir do teste F, assumindo um nível de significância de 95%.

Os valores de F calculado do modelo foram superiores ao valor tabelado $F_{tab} = 3,9146$ para EK, $F_{tab} = 3,8973$ para PA, $F_{tab} = 3,8866$ para LA, $F_{tab} = 3,8880$ para PVA, indicando que há diferença significativa entre a umidade volumétrica calculada e a leitura do sensor 5TE. Todos os parâmetros da equação de calibração do sensor foram significativos ($P < 0,05$) para todos os solos estudados.

TABELA 8 - Análise de variância dos modelos ajustados entre os valores medidos e estimados do sensor 5TE após a calibração

	FV	GL	SQ	QM	F	F significação
Espodossolo	Regressão	1	1,1797	1,1797	2951,0180	$2,4975.10^{-83}$
	Resíduo	114	0,0456	0,0004		
	Total	115	1,2252			
Argissolo Amarelo	Regressão	1	0,7313	0,7313	818,7272	$2,9984.10^{-50}$
	Resíduo	101	0,0902	0,0009		
	Total	102	0,8215			
Latossolo	Regressão	1	0,6377	0,6377	3037,2153	$8,1883.10^{-73}$
	Resíduo	93	0,0195	0,0002		
	Total	94	0,6573			
Argissolo Vermelho Amarelo	Regressão	1	0,7266	0,7266	1141,5229	$2,2441.10^{-54}$
	Resíduo	94	0,0598	0,0006		
	Total	95	0,7864			

FV- fontes de variação;

GL - número de graus de liberdade;

SQ - soma de quadrados,

QM - quadrado médio;

F - coeficiente calculado pela distribuição;

F significação - nível de significância a 5%.

As diferenças de leituras de umidade dos solos estudados entre os sensores EC-5 e 5TE, conforme calibração do fabricante, estão apresentados na Figura 10. As curvas de umidades indicam valores de leituras bem próximos entre os sensores. A pequena diferença de leitura existente entre os sensores, pode ter sido devido à variação de temperatura e textura

dos solos, já que os sensores têm diferenças quanto à sensibilidade, à temperatura, textura e salinidade (KODESAVÁ et al., 2011).

Os solos com textura arenosa perdem grande quantidade de água, que está retida nos macroporos, logo nas primeiras leituras. Depois, as curvas mantiveram-se mais lineares até a estabilização da umidade, como pode ser observado na Figura 11.

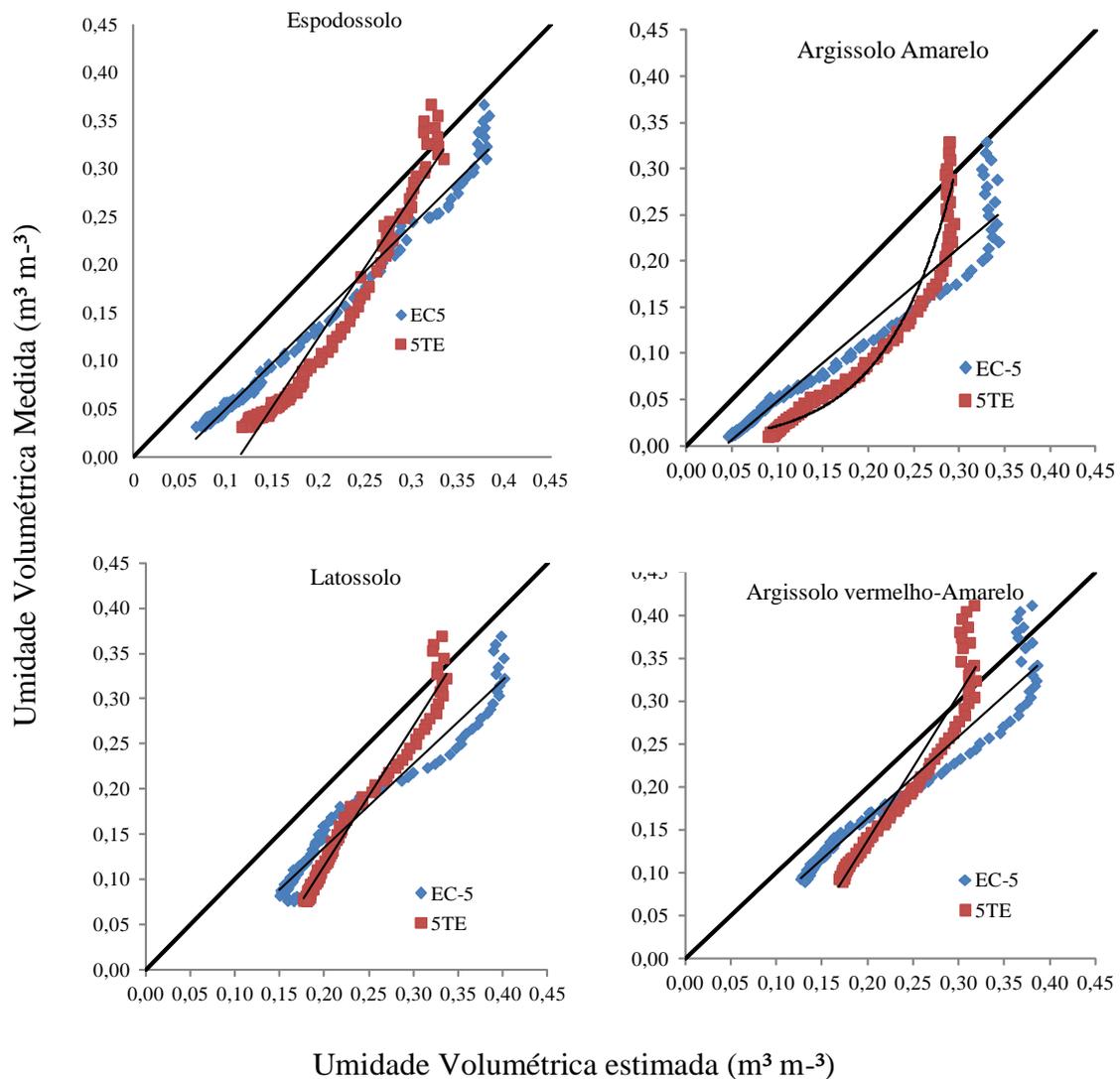


FIGURA 10 - Comparação entre as leituras estimadas pelos sensores EC-5 e 5TE, antes da calibração.

Ainda na Figura 11 pode-se observar a relação entre os valores de umidade volumétrica dos dois sensores devidamente calibrados, onde apresentam r^2 de 0,98 para EK, 0,97 para PA, 0,98 para LA, 0,99 para PVA e um ótimo ajuste para reta 1:1. Esses resultados

indicam que tanto o EC-5 como o 5TE pode ser usado de forma satisfatória para esses tipos de solos.

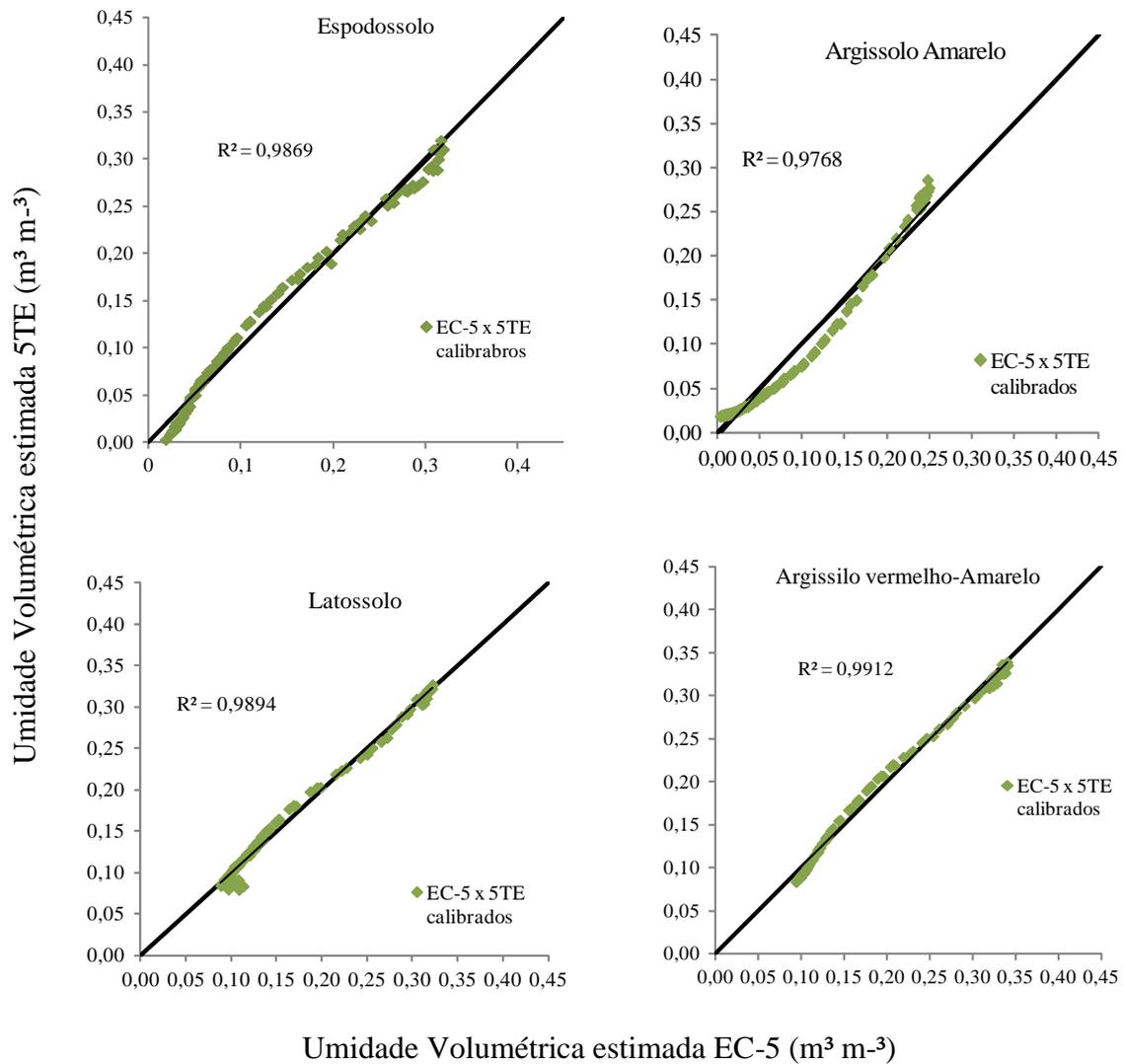


FIGURA 11. Umidade volumétrica estimada após a calibração do sensor EC-5 e 5TE.

Os dados reforçam a necessidade de calibração de ambos os sensores já que, nos dois casos, a calibração do fabricante subestima os valores reais de umidade do solo. Este fato também foi comprovado por outros autores como Miranda et al. (2007); Trintinalha et al., (2008); Cardenas-Lailhacar e Dukes. (2010); Kodesová et al. (2011) quando concluíram que os sensores capacitivos ECH₂O podem ser uma ferramenta útil para ajudar o produtor rural, porém necessitam de calibração para o tipo de solo no qual serão instalados.

CONCLUSÕES

Os sensores EC-5 e 5TE, quando devidamente calibrados, podem ser utilizados com bons resultados na determinação da umidade de todos os solos estudados.

O sensor EC-5 é mais apropriado do que o 5TE para a determinação da umidade dos solos estudados.

As curvas de calibração do fabricante dos sensores ECH₂O modelos EC-5 e 5TE não se aplicam para os solos estudados.

REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2** Ed. Especial. Brasília, 2012. 215 p.
- ANDRADE, L.T.; COELHO, E.F.; COUTO, L.; SILVA, E.L. **Parâmetros de solo-água para a engenharia de irrigação e ambiental**. In: Congresso brasileiro de engenharia agrícola, Poços de Caldas. Anais. Lavras: UFLA-SBEA, p. 1-45, 1998.
- BARBOSA, M.A.G.; FIGUEIREDO, V.B.; MEDEIROS, J.F., NASCIMENTO, I.B.; CARVALHO, B. L.; PALÁCIO, V.S. **Calibração de sensor FDR ECH2O para determinação da umidade em dois tipos de solos**. In: Inovagri International Meeting & IV Winotec: Fortaleza, 2012.
-
- BRULAND, G.L.; RICHARDSON, C.J. Spatial variability of soil properties in created, restored, and paired natural wetlands. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 1, p. 273–284, 2005.
- CAMARGO, A.P; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARDENAS-LAILHACAR, B.; DUKES, M.D. Precision of soil moisture sensor irrigation controllers under field conditions. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 5, p. 666-672, 2010.
- CEMIG. Companhia Energética de Minas Gerais. **Estudo de Otimização Energética**. Belo Horizonte, 1993. 22 p.
- COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M.A.; OLIVEIRA, S.L. Agricultura Irrigada: Eficiência de irrigação e uso de água. **Revista Bahia Agrícola**, v. 7, n. 1, p. 57-60, 2005.
- COELHO, E.F.; VELLAME, L.M.; COELHO FILHO, M.A. Sonda de TDR para estimativa e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 81-87, 2005.
- CRUZ, T.M.; TEIXEIRA, A.D.S.; CANAFÍSTULA, F.J.; SANTOS, C.C.D.; OLIVEIRA, A. D.; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p. 33-45, 2010.
- DORNELES, J.G.L.; RUIVARO, C. Proposta de procedimento para calibração de sensores de umidade ECH2O para manejo de irrigação. **Vivências: Revista Eletrônica de Extensão da URI**, v. 8, n. 14, p. 210-218, 2012.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ, 1997. p. 212. Centro Nacional de Pesquisas de Solos.

FREITAS, W.A.; CARVALHO, J.D. A.; BRAGA, R.A.; ANDRADE, M.J. Manejo da irrigação utilizando sensor da umidade do solo alternativo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 3, p. 268-274, 2012.

GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; SILVA, A.P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-Brasil, v. 23, n. 1, p. 155-164, 1999.

HAM, J.M.; BENSON, E.J. On the construction and calibration of dual-probe heat capacity sensors. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 4, p. 1185-1190, 2004.

INOUE, M.; AHMED, O.; SAITO, T.; IRSHAD, M.; UZOMA, K. C. Comparison of three dielectric moisture sensors for measurement of water in saline sandy soil. **Soil use and management**, v. 24, n. 2, p. 156-162, 2008.

KINZLI, K.D.; MANANA, N.; OAD, R. Comparison of laboratory and field calibration of a soil-moisture capacitance probe for various soils. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 138, n. 4, p. 310-321, 2011.

KITIĆ, G.; CRNOJEVIĆ-BENGIN, V. A Sensor for the Measurement of the Moisture of Undisturbed Soil Samples. **Sensors**, v. 13, n. 2, p. 1692-1705, 2013.

KIZITO, F.; CAMPBELL, C.S.; CAMPBELL, G.S.; COBOS, D.R.; TEARE, B.L. CARTER, B.; HOPMANS, J.W. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, v. 352, n. 3, p. 367-378, 2008.

KODEŠOVÁ, R.; KODEŠ, V.; MRAZ, A. Comparison of two sensors ECH₂O EC-5 and SM200 for measuring soil water content. **Soil and Water Research**, v. 6, n. 2, p. 102-110, 2011.

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

LIMA, J.E.F.W.; FERREIRA, R.S.A.; CHRISTOFIDIS, D. O uso da irrigação no Brasil. O estado das águas no Brasil. In: **Agência Nacional de Energia Elétrica**. CD-ROM, 1999.

MANIERI, J.M.; VAZ, C.M.P.; CLERICI, I.M.. Sonda espiral de TDR para a medida da umidade no perfil do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 191-198, 2007.

MASCARENHAS, J.C.; BELTRÃO, B.A.; SOUZA Jr.; GALVÃO, M.J.T.G.; PEREIRA, S. N.; MIRANDA, J.L.F. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. **Diagnóstico do município de Goiana, estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 21p.

MIRANDA, F.R.; SANTANA, M.G.S.; de SOUZA, C.C.M.; OLIVEIRA, C.H.C. Calibração do sensor dielétrico ECH₂O em dois tipos de solo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 38, n. 3, p. 317-321, 2007.

MITTELBAACH, H.; LEHNER, I.; SENEVIRATNE, S.I. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. **Journal of Hydrology**, v. 430, p. 39-49, 2012.

OAD, R.; GARCIA, L.; KINZLI, K.D.; PATTERSON, D.; SHAFIKE, N. Decision support systems for efficient irrigation in the Middle Rio Grande Valley. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 135, n. 2, p. 177-185, 2009.

OAD, R.; KULLMAN, R. Managing irrigation for better river ecosystems a case study of the Middle Rio Grande. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 132, n. 6, p. 579-586, 2006.

REZAEI, M.; EBRAHIMI, E.; NASEH, S.; MOHAJERPOUR, M. A new 1.4-GHz soil moisture sensor. **Measurement**, v. 45, n. 7, p. 1723-1728, 2012.

RIBEIRO, M.R.; JACOMINE, P.K.T.; LIMA, J. **Caracterização de solos de referência do Estado de Pernambuco**, 1999. 104 p. (Relatório Científico) Universidade Federal de Pernambuco.

RICHARDS, L.A., Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. **Soil Science**, v. 78, n. 2, p. 154, 1954.

ROBINSON, D.A.; CAMPBELL, C.S.; HOPMANS, J.W.; HORNBUCKLE, B.K.; JONES, S.B.; KNIGHT, R.; WENDROTH, O. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories. **A review: Vadose Zone Journal**. v. 7, n. 1, p. 358-389, 2008.

SANTOS JÚNIOR, J.C.; FRIZZONE, J.A.; SILVA PAZ, P.V. Otimização do uso da água no perímetro irrigado formoso aplicado lâmina máximas de água. **Irriga**, v. 19, n. 2, p. 196, 2014.

SILVA, D.N.; DUARTE, S.N.; FILHO, J.F.T.; YOSHINAGA, R.T. Salinização do solo por aplicação de fertilizantes em ambiente protegido. **Irriga**, v. 12, n. 1, p. 135-143, 2007.

SOTO, M.A.A; KUMAYAMA, D.M; CHANG, H.K. Calibração de um reflectômetro para estudos do fluxo de água em solo não saturado. **Geociências**, v. 26, n. 4, p. 357-368, 2007.

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.; FERRE, P.A. **The soil solution phase: Methods of soil analysis**. Madison: Science Society of America, p. 417-1074, 2002.

TRINTINALHA, M.A.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; COSTA, A.C.S.; FOLEGATTI, M.V.; DE FREITAS, P.S.L.; REZENDE, R. Comparação dos sistemas TDR e ECHO para medida de umidade, em um solo argiloso e em areia-DOI: 10.4025/actasciagron.v26i3.1841. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 26, n. 3, p. 353-360, 2008.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic Press, 1980. 350p.

WHITAKER, M.P.; FERRÉ, T.; NIJSSEN, B.; WASHBURNE, J. Design and testing of a low-cost soil-drying oven. **Vadose Zone Journal**, v. 5, n. 3, p. 856-859, 2006.

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

YODER, R.E.; JOHNSON, D.L.; WILKERSON, J.B.; YODER, D.C. Soil water sensor performance. **Applied engineering in agriculture**, v. 14, n. 2, p. 121-133, 1998.

ZHANG, R.B.; GUO, J.J.; ZHANG, L.; ZHANG, Y.C.; WANG, L.H.; WANG, Q. A calibration method of detecting soil water content based on the information-sharing in wireless sensor network. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 76, n. 2, p. 161-168, 2011.