



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES FDR (Frequency Domain
Reflectometry) PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO**

RICARDO MARTINS SANTOS

CRUZ DAS ALMAS - BAHIA

MAIO - 2005

CALIBRAÇÃO DE SENSORES FDR (Frequency Domain Reflectometry) PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO

RICARDO MARTINS SANTOS

Engenheiro Agrônomo
Escola Superior de Agricultura de Mossoró - ESAM, 1993

Dissertação submetida à Câmara de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Ciências Agrárias - Área de Concentração: Uso, Manejo e Conservação dos Recursos Naturais Água e Solo.

‘Orientador: Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CRUZ DAS ALMAS - BAHIA - 2005

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira
Escola de Agronomia - UFBA
(Orientador)

Prof. Dr. Mauricio Antonio Coelho Filho
EMBRAPA – Mandioca e Fruticultura

Prof. Dr. José Fernandes de Melo Filho
Escola de Agronomia - UFBA

Dissertação homologada pelo Colegiado de Curso de Mestrado em Ciências Agrárias em

Conferindo o Grau de Mestre em Ciências Agrárias em.....

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e irmã
Austecolino José dos Santos, Selma Maria Martins Santos e Adriana Martins
Santos, pela preocupação e dedicação que marcam a união de uma família.

A minha esposa Paula Patrícia
Mulher que amo e com quem divido alegrias e tristezas, pela paciência e
incentivo.

As minhas filhas Allana e Nathália
Motivadoras de minhas alegrias e preocupações, por nortearem os meus
objetivos de vida.

Ao meu tio "Caubi"
Pelo companheirismo, amizade e incentivo repassados através da sabedoria de
quem conhece os caminhos da verdade.

A Margarida, irmã de coração
Pelos momentos de descontração e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela possibilidade de existir e fonte de toda sabedoria;

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, por proporcionar a oportunidade de aperfeiçoar meus conhecimentos teóricos;

À Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba – CODEVASF, por viabilizar os meios para que este trabalho fosse concluído;

À TOLEDO DO BRASIL S.A. pela cessão do módulo indicador e dos pesos padrões.

Ao Prof. Dr. Áureo Silva de Oliveira, pelos conselhos, pela amizade, orientação e paciência atributos que nortearam sua participação efetiva em todas etapas deste trabalho;

Ao Eng. Lucas Melo Vellame, colega de curso e amigo que me ensinou durante nossa convivência que a presença terrena tem seus mistérios, pelo apoio na coleta e tabulação de dados;

Aos Profs. Drs. Francisco Adriano Pereira e Vital Pedro da Silva, pelo apoio, amizade e ensinamentos durante o curso;

Ao Prof. Carlos Alfredo Lopes de Carvalho, pelo exemplo de dedicação na melhoria do curso;

Aos colegas de curso Grace Ximena, Célia Maria e Edmilson Borges pela amizade e companheirismo;

Ao colega de curso Leonardo da Costa Lopes, pela convivência fraterna, amizade e ensinamentos de vida;

À Sidiney Ferreira Sardinha, pela amizade e eficiência nas suas funções de secretária do curso;

Aos funcionários da estação experimental, Sergio e Silene, pela ajuda indispensável na retirada das amostras;

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Sinceramente,
MUITO OBRIGADO!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	
ABSTRACT	
INTRODUÇÃO	9
Capítulo 1	
MONTAGEM E ACURÁCIA DE UM SISTEMA EXPERIMENTAL DE PESAGEM PARA CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO.....	13
Capítulo 2	
CALIBRAÇÃO DE SENSORES FDR (Frequency Domain Reflectometry) PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO.....	27
CONSIDERAÇÕES FINAIS	53

CALIBRAÇÃO DE SENSORES FDR (Frequency Domain Reflectometry) PARA ESTIMATIVA DE UMIDADE DO SOLO

Autor: Ricardo Martins Santos

Orientador: Aureo Silva de Oliveira, PhD

RESUMO: Um trabalho foi desenvolvido no Centro de Ciências Agrárias e Ambientais da Universidade Federal da Bahia, campus de Cruz das Almas (12°40'S, 39°30'W), BA, visando à calibração de dois sensores FDR (Frequency Domain Reflectometry) para estimativa de umidade do solo. Procedeu-se o desenvolvimento e teste de um sistema de pesagem com capacidade de 59 Kg para utilização em gravimetria como método padrão de calibração de sensores FDR para estimativa da umidade do solo. O modelo de calibração encontrado foi do tipo linear ($r^2 = 0,999$) e os erros de repetibilidade, histerese e linearidade foram da ordem de 0,119, 0,068 e 0,009% do final de escala (FE), respectivamente. Os limites do erro de acurácia, que representa o desempenho geral do sistema, foram $\pm 0,083\%$ de FE. A calibração das sondas FDR foi dividida em duas etapas: calibração de laboratório e de campo. O trabalho de laboratório consistiu na retirada de monólitos de seis profundidades (10, 30, 50, 70, 90, e 110 cm) e após saturação eram medidas as suas umidades volumétricas (θ), através da variação de massa e os valores correspondentes do parâmetro D (unidade adimensional que expressa a variação da frequência da onda eletromagnética emitida pelos sensores) das duas sondas, obtendo-se pares ordenados e em seguida foram ajustadas equações com $\theta = f(D)$. Na calibração de campo uma trincheira foi aberta e foram inseridos dez tubos de acesso para as sondas, cinco em cada lado da trincheira distribuídos eqüidistantes. As leituras com as sondas foram realizadas nas mesmas profundidades dos trabalhos de laboratório e duas amostras indeformadas foram retiradas, para análise gravimétrica, em torno do tubo nas mesmas profundidades de leitura das sondas. Obteve-se pares ordenados (D e θ), em seguida ajustou-se modelos com $\theta = f(D)$. Os resultados mostraram que a calibração das sondas em laboratório foi mais adequada, pois apresentou melhores coeficientes de determinação em todas as profundidades e que o modelo exponencial na calibração de laboratório apresentou melhor desempenho que o linear.

Palavras-chave: Calibração, sistema de pesagem, FDR.

ABSTRACT (UMA PÁGINA)

INTRODUÇÃO

A superfície do nosso planeta é recoberta em cerca de 70% de água, sendo que 97,5% deste total é água salgada, dos 2,5% de água doce existente, 70% encontram-se nas geleiras e menos de 1% estão disponíveis para uso com fácil acesso (SHIKLOMANOV, 1993).

Em se tratando de Brasil, podemos afirmar que o nosso país desfruta de posição privilegiada no tocante a disponibilidade de recursos hídricos, quando comparado a outros países. Segundo a Secretaria de Recursos Hídricos (2003), contamos com cerca de 13,7% das reservas mundiais de água doce superficiais, contudo, a Região Amazônica detém mais de 60% deste manancial e com apenas 7% da população. Este fato nos leva a refletir sobre a necessidade de se gerenciar adequadamente o uso da água em nosso país, pois, mesmo contando com grandes reservas, sua distribuição é irregular.

Atualmente a teoria do uso múltiplo das águas é a que norteia todas as formas de gerenciamento dos recursos hídricos, nesse contexto temos a irrigação como a atividade que mais consome água no mundo.

Na moderna agricultura, a irrigação, principalmente em regiões com irregularidade na distribuição pluviométrica, torna-se prática imprescindível para suprir as necessidades hídricas das culturas, permitindo a atividade agrícola, continuidade no processo, propiciando ganhos de produtividade.

Segundo Sinha et al.(1985), em geral a produtividade média das culturas irrigadas é três ou quatro vezes maior do que a produtividade média das culturas não irrigadas.

Quando bem administrada, a agricultura irrigada tende a ser uma atividade altamente rentável, gerando emprego e renda nas regiões onde é desenvolvida.

Em regiões tropicais é comum se notar irregularidade na distribuição pluviométrica durante o ano, definindo-se dois períodos distintos, um período seco e outro chuvoso. Em áreas onde não se pratica a irrigação, a atividade agrícola só poderá ser desenvolvida satisfatoriamente no período chuvoso, no período seco a atividade torna-se incipiente, levando a região a um déficit de produtos oriundos

do setor agrícola, influenciando assim no aumento dos preços destes produtos, bem como no custo de vida da população.

A utilização da irrigação em atividades agropecuárias é, sem dúvida, imprescindível para o sucesso econômico/financeiro destas atividades. Além de promover sensíveis aumentos de produtividade, a irrigação promove melhorias significativas na qualidade dos produtos. Como atualmente as atividades ligadas à agropecuária devem ser encaradas de forma empresarial, sob pena de não se alcançar os objetivos técnicos e econômicos preconizados, deve-se tornar incessante a busca por redução dos custos de produção e aumento da eficiência da atividade.

A água, por ser um recurso natural imprescindível para o desenvolvimento da vida, deve ser tratada com racionalidade, pois seu desperdício e/ou mau uso, afeta sensivelmente o meio ambiente e a rentabilidade da atividade. Geralmente, os agricultores brasileiros irrigam suas plantações baseados em aspectos visuais do solo e da planta, sem levar em consideração as reais necessidades das culturas e o conteúdo efetivo de água no solo, disponível para absorção das plantas. Isso ocasiona aplicação de água insuficiente ou em excesso, podendo aumentar a ocorrência de doenças, diminuição da aeração do solo, elevação dos custos de produção, diminuição da produtividade e conseqüentemente afetar a rentabilidade da atividade. A determinação da umidade do solo constitui uma importante ferramenta nos estudos relacionados com o movimento de água no solo e manejo de irrigação. Existem diversos métodos para se determinar a umidade do solo e a escolha do método dependerá de fatores como: custo, facilidade de operação, manutenção, objetivos, disponibilidade de mão-de-obra, etc.

Para Bernardo (1995) é de capital importância a determinação da umidade do solo para estudos de movimento d'água no solo, disponibilidade d'água no solo, erosão, época e quantidade d'água aplicada em irrigação e muitos outros problemas.

Várias são as proposições para determinação da umidade, ou teor de água do solo, porém nenhuma consegue satisfazer todas as necessidades e requisitos básicos para que se torne o método ideal.

Hignett (2000) analisando diversos métodos utilizados em medições do conteúdo de água no solo concluiu que cada um tem suas vantagens e desvantagens, sendo que em diferentes aplicações, a vantagem em uma pode ser desvantagem em outra. Portanto, não existe um método perfeito para todos os casos. Para selecionar o melhor, é necessário ter adequado conhecimento das propriedades do solo de interesse, das tecnologias disponíveis e dos objetivos desejados.

O que resta à pesquisa é continuar aprimorando estas várias propostas, reduzindo, eliminando ou contornando os pontos negativos. Dos vários métodos existentes, a reflectometria no domínio da frequência - FDR (frequency domain reflectometry) vem despertando muito interesse, devido principalmente à possibilidade de leituras em tempo real e automatizadas. Este método baseia-se na constante dielétrica, que é a capacidade de um material não condutor em transmitir ondas ou pulsos eletromagnéticos de alta frequência. Contudo existem limitações do método, como: o custo elevado do equipamento, devido principalmente à eletrônica sofisticada e a necessidade de calibração.

Segundo o SEBRAE (2003), calibração é o conjunto de operações que visam estabelecer, sob condições específicas, a relação entre valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição, valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões. Suas finalidades principais são a apuração da confiabilidade das medições e a seleção ou o teste de viabilidade do uso de um instrumento ou sistema de medição.

Segundo Gilberto Jr. (2003), algumas características desejáveis de um método ou instrumento para monitoramento da água no solo são: evitar a amostragem destrutiva, permitir repetição no espaço e no tempo, permitir automação, fácil calibração, custo acessível, segurança ao operador, rapidez na obtenção de resultados.

A reflectometria no domínio da frequência - FDR (frequency domain reflectometry) é uma técnica que contempla grande parte das características desejáveis para um equipamento que monitora a água no solo.

O objetivo geral deste trabalho foi a calibração em condições de laboratório e campo, de duas sondas FDR. Especificamente, objetivou-se avaliar o desempenho de ambas as sondas através de modelos exponenciais e lineares de calibração, para um perfil de solo de 110 cm de profundidade.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 6ª edição. UFV. Viçosa (MG). 1995. 657p.
- GILBERTO Jr., O. J. **Desempenho do reflectômetro no domínio do tempo na detecção de variações de umidade do solo**. 2003. 94 p. Dissertação (Mestrado) – ESALQ, Piracicaba – SP.
- HIGNETT, C.T. **Factors affecting the selecting of a soil water sensing technology**. In: **International Atomic Energy Agency. Comparison of soil water measurement using the neutron scattering, time domain reflectometry and capacitance methods**. Viena: IAEA, 200. p. 51-64.
- SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Metrologia: calibração**. Disponível em <<http://www.sebraesc.com.br/sebraetib/conceito/metrologia/calibração>> Acessado em 04/10/2004.
- SECRETARIA DE RECURSOS HODRICOS. **A água no Brasil e no mundo**. Agência Nacional de Águas. Ministério de Meio Ambiente. Disponível em <<http://www.ana.com.br/gestaorechidricos/infohidrologicas/docs/aguanobrasilenomundo2.html>> Acessado em 09 de agosto de 2003.
- SHIKLOMANOV, I. World fresh water resource. In: GLEIK, P.H. (ed.) **Water in crisis: a guide to the world fresh water resource**, 1993.
- SINHA, S. K.; AGGARWAL, P.K.; E KHANNA-CHOPPRA, R. **Irrigation in India: a physiological and phenological approach in water management of grain crops**. In: Hillel, D. (ed.) **Advances in Irrigation**, Vol. 3. Academic Press, 1985.

CAPÍTULO 1

MONTAGEM E ACURÁCIA DE UM SISTEMA EXPERIMENTAL DE PESAGEM PARA CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO¹

¹Artigo ajustado para submissão ao Comitê Editorial do periódico científico Ciência e Agrotecnologia, Lavras, Minas Gerais

MONTAGEM E ACURÁCIA DE UM SISTEMA EXPERIMENTAL DE PESAGEM PARA CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO

RESUMO - O presente trabalho descreve os procedimentos de desenvolvimento e teste de um sistema de pesagem de grande capacidade para utilização em gravimetria como método padrão de calibração de sensores de umidade do solo. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Irrigação e Drenagem, Centro de Ciências Agrárias e Ambientais da Universidade Federal da Bahia, campus de Cruz das Almas (12°40'S, 39°30'W), BA. O princípio de funcionamento do sistema de pesagem baseia-se no seu componente principal, a célula de carga. Utilizou-se uma célula de carga do tipo flexão, de capacidade 60 kg e sensibilidade de 2 mV/V, quando submetida à carga máxima. A calibração foi realizada por meio de massas-padrão de 1, 5, 10 e 20 kg em sete ciclos de carregamento e descarregamento. O modelo de calibração encontrado foi do tipo linear ($r^2 = 0,999$) e os erros de repetibilidade, histerese e linearidade foram da ordem de 0,119, 0,068 e 0,009% do final de escala (FE), respectivamente. Os limites do erro de acurácia, que representa o desempenho geral do sistema, foram $\pm 0,083\%$ de FE. O sistema de pesagem foi considerado adequado, do ponto de vista de funcionalidade e desempenho, para calibração em condições controladas, de sensores de umidade do tipo sonda de capacitância, utilizando-se amostras indeformadas de solo.

TERMOS PARA INDEXAÇÃO: Gravimetria, célula de carga, instrumentação agrícola.

ASSEMBLING AND ACCURACY OF AN EXPERIMENTAL WEIGHING SYSTEM FOR CALIBRATION OF SOIL MOISTURE SENSORS

ABSTRACT – This work describes the development and testing of a large-capacity weighing system for calibration of soil moisture sensors in which the gravimetric method is taken as the standard one. The experiment was conducted

at the Irrigation and Drainage Laboratory of the College of Environmental and Agricultural Sciences, of the Federal University of Bahia, at Cruz das Almas (12°40'S, 39°30'W), State of Bahia, Brazil. The main component of the system was a 60-kg load cell with a 2-mV/V sensibility when submitted to the maximum load. In the calibration process standard weights of 1, 5, 10 and 20 kg were used during seven loading and unloading cycles. A linear calibration model ($r^2 = 0.999$) was found and the repeatability, hysteresis, and linearity errors were 0.119%, 0.068%, and 0.009% of full scale (FS). The accuracy limits, which represent the overall performance of the weighing system, were $\pm 0.083\%$ of FS. The weighing system, in terms of functionality and performance, was considered to be adequate for calibration of soil moisture sensors, like capacitance gages, with undisturbed soil samples under laboratory conditions.

INDEX TERMS: Gravimetric method, load cell, agricultural instrumentation

INTRODUÇÃO

No solo, o fenômeno de retenção da água (resultante de forças de retenção associadas à matriz do solo) contra forças externas (decorrentes, por exemplo, do campo gravitacional) tem sido há muito reconhecido como uma das funções primárias do solo na sustentação do crescimento e desenvolvimento das plantas sob condições de suprimento intermitente de água (GROENEVELT & BOLT, 1971; LIBARDI, 2000). Do ponto de vista agrícola, a importância da umidade do solo estende-se também a outros campos como a mecanização, fertilização e irrigação da parcela cultivada.

Para determinação do teor de água no solo os métodos atualmente disponíveis podem ser genericamente classificados em diretos e indiretos. A gravimetria é considerada um método direto, em que a massa de água presente numa dada amostra de solo é obtida por diferença entre o peso da amostra antes e depois da secagem em estufa de circulação forçada de ar por um intervalo mínimo de 24 h sob temperatura de 105°C. Os métodos indiretos geralmente empregam sensores que requerem algum tipo de calibração. Nestes casos, a gravimetria é adotada como método padrão devido a sua simplicidade, praticidade

e precisão, especialmente quando se usa balança digital com resolução próxima de centésimos de grama. Por outro lado, apresenta desvantagens por ser um método destrutivo e demorado, quando comparado aos métodos indiretos (GILBERTO JR., 2003), dificultando a sua aplicação nos casos em que o conhecimento da umidade solo é exigido com maior frequência.

A calibração e a avaliação do desempenho de sensores de umidade podem ser feitas no campo ou em laboratório. Neste último caso, amostras de solo, de preferência indeformadas, são extraídas do perfil do solo e submetidas a regimes de molhamento e secamento. O tamanho da amostra de solo para calibração do sensor depende do tipo e princípio de funcionamento do equipamento, bem como da precisão desejada. Sondas de nêutrons e alguns modelos de sondas de capacitância podem requerer amostras de grande massa, o que demanda sistemas de pesagem de maior capacidade. Nestes casos o custo de aquisição de balanças de precisão torna-se um sério fator limitante e o desenvolvimento de plataformas de pesagem a partir de componentes de baixo custo pode ser uma alternativa viável.

O objetivo deste estudo foi desenvolver um sistema de pesagem de amostras indeformadas de solo e avaliar os seus limites de confiabilidade, com ênfase nos erros de repetibilidade, histerese, linearidade e acurácia do sistema, para fins de calibração de sondas de capacitância.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Irrigação e Drenagem, do Núcleo de Engenharia de Água e Solo, do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais da Universidade Federal da Bahia, campus de Cruz das Almas (12°40'S, 39°30'W), Bahia. Os seguintes materiais e equipamentos foram utilizados para confecção do sistema de pesagem: três chapas de aço carbono nas dimensões de 40 cm x 40 cm x 0,5 cm, três cantoneiras de 40 cm x 10 cm, quatro parafusos para fixação, uma célula de carga, massas-padrão de 1, 5, 10 e 20 kg e um módulo indicador digital (modelo 8132, Toledo do Brasil S.A., São

Paulo, SP)² programado para uma resolução de 10 g. Após montagem, o sistema de pesagem se apresentou como visto na Figura 1.

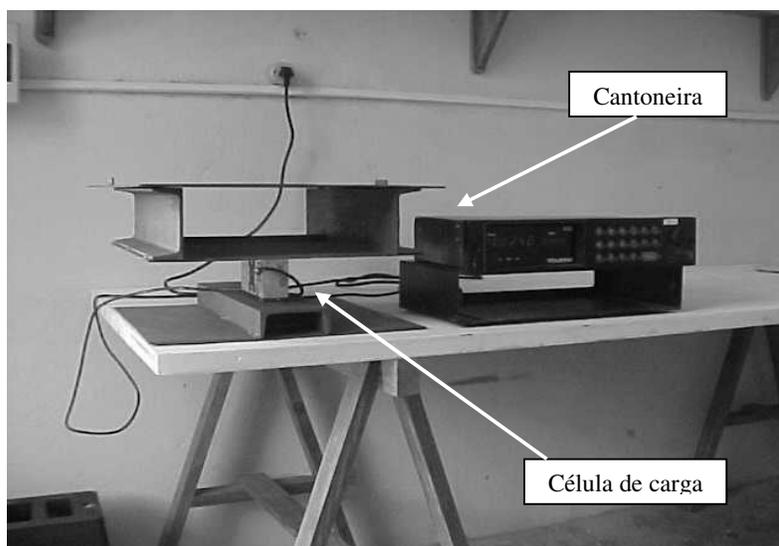


FIGURA 1 – Vista geral do sistema de pesagem (plataforma à esquerda e módulo indicador à direita), com indicação da célula de carga e uma das cantoneiras instaladas para evitar deformação

O principal componente do sistema de pesagem é a célula de carga, que em função da tensão de alimentação emite um sinal elétrico proporcional à massa aplicada. A célula de carga utilizada neste trabalho (Figura 2) era do tipo flexão, com capacidade máxima de 60 kg, possuindo compensação de temperatura e sensibilidade nominal de 2mV/V quando submetida a uma carga máxima de 60 kg. Esta última característica define a sensibilidade do sensor, dada neste caso, pela variação do sinal de saída por unidade tensão de alimentação.

A célula de carga da Figura 2 é constituída de extensômetros, que segundo Coelho Filho et al. (2004), compõem-se de uma folha plástica coberta com finas trilhas de um material condutor. Quando uma superfície à qual o extensômetro está aderido se deforma, o comprimento e o diâmetro das trilhas se alteram, variando conseqüentemente a sua resistência elétrica em função da massa a que a célula é submetida.

² A menção de marcas registradas e modelos não implica em recomendação expressa por parte dos autores.

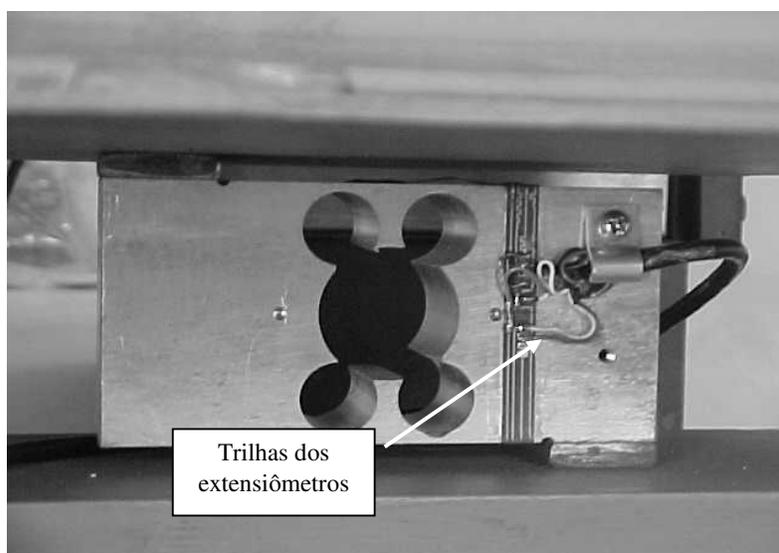


FIGURA 2 – Detalhe da célula de carga do tipo flexão

As dimensões e capacidade da plataforma de pesagem devem ser definidas em função da massa de solo a ser medida e do tipo de sensor de umidade utilizado. A plataforma deste estudo (Figura 1) foi desenvolvida com dimensões específicas para calibração de uma sonda de capacitância, em laboratório, modelo Sentry 200-AP (Troxler Laboratories, Inc., Research Triangle Park, NC, USA) semelhante à descrita por Dean et al. (1987). Este mesmo design de plataforma e sistema de pesagem também pode ser utilizado para calibração de sondas de capacitância multisensores, a exemplo do modelo EnviroScan (EnviroSCAN, Sentek Pty Ltd., South Austrália, Austrália). Características deste modelo multisensor de sonda foram apresentadas por Paltineanu & Starr (1997). As sondas de capacitância requerem a instalação de tubos de acesso do sensor de umidade, de forma a evitar seu contato direto com o solo. Semelhantes cuidados são igualmente exigidos por sondas de nêutrons.

Segundo Gonçalves Jr. (2004), calibração é um procedimento experimental através do qual são estabelecidas, sob condições específicas, as relações entre os valores indicados por um sistema de medição e os valores correspondentes às grandezas estabelecidas por padrões. A calibração do sistema de pesagem aqui descrito foi realizada seguindo recomendações de Wheeler & Gangi (1996). Para tanto, utilizaram-se massas-padrão de fabricação da Toledo do Brasil S.A., rastreadas à Rede Brasileira de Calibração e atendendo aos requisitos das Normas

ISO 9000. Como a capacidade máxima da célula de carga era de 60 kg, a carga máxima aplicada foi de 59 kg. Este cuidado objetivou evitar sobrecarga na célula tendo em vista o peso adicional da plataforma.

De acordo com o procedimento sugerido por Wheeler & Gangi (1996), massas-padrão foram gradativamente adicionadas e retiradas da plataforma de pesagem, em vários ciclos de carregamento e descarregamento. Sete ciclos foram realizados, anotando-se as massas aplicadas e os correspondentes valores lidos no módulo indicador. Entre valores aplicados e medidos, o conjunto de dados obtidos totalizou 252 pares ordenados. De posse dessas informações os seguintes parâmetros de performance do sistema de pesagem foram determinados: erro de repetibilidade, erro de histerese, erro de linearidade e acurácia.

Os erros de repetibilidade e histerese são de precisão, por não se repetirem a cada leitura, não podendo, portanto, ser compensados (COELHO FILHO et al., 2004). O erro de repetibilidade correspondeu à máxima diferença entre as medidas seguindo uma única direção, carregamento ou descarregamento, considerando todos os ciclos e o erro de histerese correspondeu à máxima diferença entre as leituras quando efetuadas de forma crescente (carregamento) ou decrescente (descarregamento) em todos os ciclos de calibração (WHEELER & GANGI, 1996).

O erro de linearidade é um erro sistemático que exprime o quanto a resposta de um sistema afasta-se de uma reta (GONÇALVES Jr. 2004). Inicialmente, os desvios médios foram plotados em função da massa aplicada e uma reta de referência foi obtida unindo-se os pontos máximo e mínimo do intervalo dos desvios. A maior distância dos pontos em relação à reta foi tomada como sendo o erro de linearidade (WHEELER & GANGI, 1996).

A acurácia ou erro máximo de um instrumento é o parâmetro que melhor define a sua qualidade, pois inclui os efeitos dos erros sistemáticos e de precisão (aleatórios) nas medições (GONÇALVES Jr., 2004). Os limites de acurácia foram expressos em termos do maior e menor desvio entre todos os ciclos de carregamento e descarregamento do processo de calibração (WHEELER & GANGI, 1996).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os dados de calibração do sistema de pesagem para os sete ciclos de carregamento e descarregamento, com os desvios já calculados como a diferença entre a massa aplicada e a leitura do módulo indicador. O erro de repetibilidade do sistema de pesagem foi de 70 g.

TABELA 1 – Desvios e erros de repetibilidade por ciclo durante o processo de calibração do sistema de pesagem

Massa aplicada (g)	Desvios (g)							Erros de repetibilidade (g)
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	
10000	0	0	0	0	0	0	0	0
20000	0	-10	-10	-10	-10	0	0	10
30000	30	0	0	-10	-20	0	10	50
40000	0	-10	-10	-20	-20	0	10	30
42000	0	-10	-10	-20	-20	0	10	30
44000	10	-10	-20	-20	-20	0	10	30
46000	10	-10	-20	-20	-20	0	10	30
48000	10	-10	-20	-20	-20	0	10	30
50000	20	-10	-20	-20	-20	0	10	40
51000	20	-10	-20	-20	-20	10	10	40
52000	20	-10	-20	-20	-20	0	20	40
53000	20	-10	-20	-10	-20	0	20	40
54000	20	-10	-20	-20	-20	0	20	40
55000	20	-10	-20	-10	-10	0	20	40
56000	20	-10	-20	-10	-10	10	20	40
57000	20	-10	-30	-20	-10	10	20	50
58000	20	-10	-30	-20	-10	10	20	50
59000	20	-20	-30	-20	-10	10	20	50
58000	20	-20	-30	-20	0	0	20	50
57000	20	-20	-30	-20	0	0	20	50
56000	20	-20	-30	-20	0	0	20	50
55000	20	-20	-30	-20	0	0	20	50
54000	20	-20	-30	-20	0	10	20	50
53000	20	-20	-30	-20	0	10	20	50
52000	20	-20	-30	-20	0	10	20	50
51000	20	-20	-40	-30	0	10	20	60
50000	20	-20	-40	-30	0	0	10	60
48000	20	-30	-50	-20	-20	20	20	70
46000	20	-30	-40	-30	-20	20	20	60
44000	20	-20	-50	-20	-20	20	20	70
42000	20	-30	-50	-20	-20	20	20	70
40000	20	-30	-50	-30	-20	20	20	70
30000	30	-20	-40	-20	-10	10	20	70
20000	40	-10	-30	-30	0	10	30	70
10000	30	-20	-30	-20	0	0	20	60
0	30	-20	-30	-20	0	0	20	60

Para uma dada massa aplicada obteve-se a diferença entre os valores indicados pelo módulo durante a etapa de carregamento e de descarregamento.

Com estas diferenças construiu-se a Tabela 2 com o objetivo de se determinar o erro de histerese do sistema de pesagem, cujo valor encontrado foi de 40 g, correspondente à aplicação de uma massa de 20000 g.

TABELA 2 – Desvios para obtenção do erro de histerese

Massa aplicada (g)	Desvios (g)						
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7
10000	30	-20	-30	-20	0	0	20
20000	40	0	-20	-20	10	10	30
30000	0	-20	-40	-10	10	10	10
40000	20	-20	-40	-10	0	20	10
42000	20	-20	-40	0	0	20	10
44000	10	-10	-30	0	0	20	10
46000	10	-20	-20	-10	0	20	10
48000	10	-20	-30	0	0	20	10
50000	0	-10	-20	-10	20	0	0
51000	0	-10	-20	-10	20	0	10
52000	0	-10	-10	0	20	10	0
53000	0	-10	-10	-10	20	10	0
54000	0	-10	-10	0	20	10	0
55000	0	-10	-10	-10	10	0	0
56000	0	-10	-10	-10	10	-10	0
57000	0	-10	0	0	10	-10	0
58000	0	-10	0	0	10	-10	0

A curva de calibração do sistema de pesagem é mostrada na Figura 3. O coeficiente angular da equação de calibração foi igual a 1, sendo considerado o valor ideal por se tratar de um sistema de indicação direta. No caso do coeficiente linear o valor obtido de 2,367 é superior a zero, considerado o ideal, porém é inferior à resolução do módulo indicador (10 g). A equação de calibração obtida já era esperada e está de acordo com Gonçalves Jr. (2004) segundo qual a equação que expressa a relação entre o estímulo (grandeza de entrada) e a sua resposta (saída) é linear e constituída de uma constante multiplicativa e/ou aditiva.

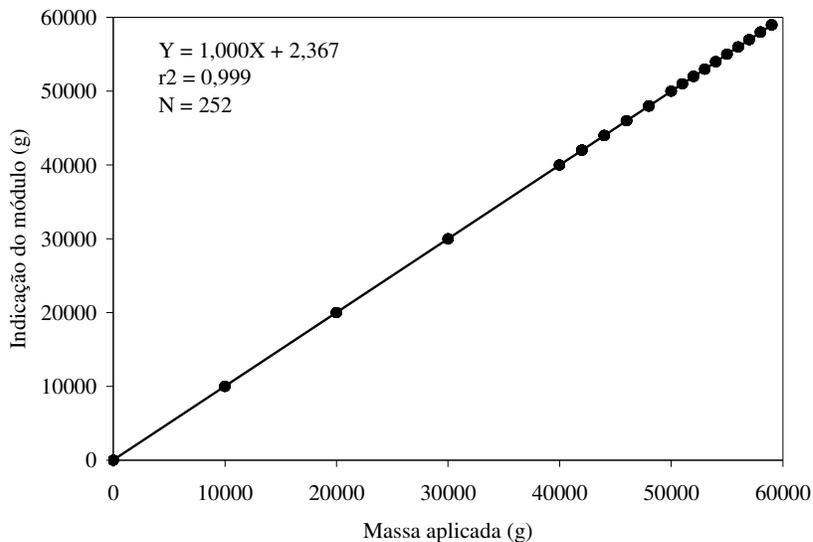


FIGURA 3 – Curva de calibração do sistema de pesagem

Os desvios médios das leituras durante as fases de carregamento e descarregamento da plataforma, juntamente com as médias dos desvios para ambas as fases combinadas são mostrados na Figura 4, que indica graficamente o valor do erro de linearidade obtido (5,14 g).

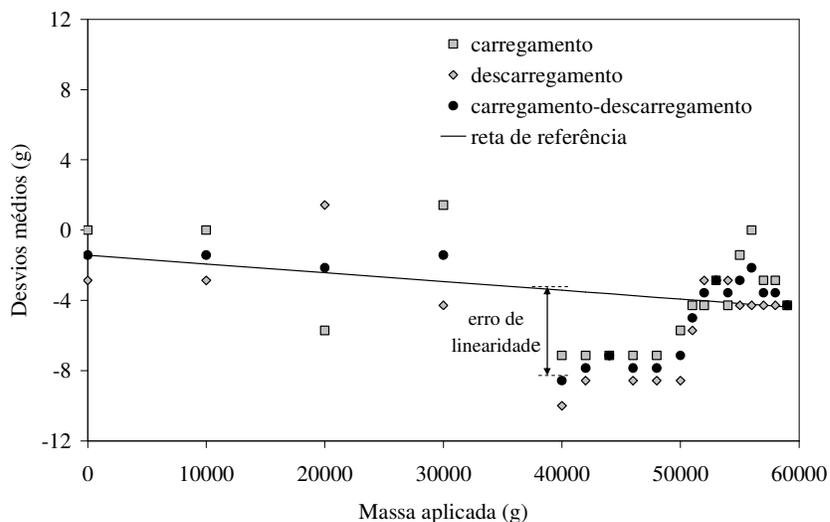


FIGURA 4 – Plotagem dos desvios médios em função da massa aplicada, com indicação gráfica do erro de linearidade

Para a acurácia do sistema de pesagem os limites encontrados foram ± 50 g correspondendo aos desvios extremos entre a massa aplicada na plataforma e a indicação do módulo, para todos os ciclos de carregamento e descarregamento.

A Tabela 3 resume os parâmetros de performance resultantes da calibração do sistema de pesagem, na qual a resolução é incluída para fins de comparação. Além das unidades de massa e percentagem do final de escala, os valores são também apresentados em termos de umidade volumétrica, neste caso para uma amostra arbitrária de solo (monólito) com as dimensões de 30 cm de diâmetro e 25 cm de altura. Amostras desse tamanho são requeridas para calibração de sensores de capacitância em condições de laboratório (Figura 5), devido à inserção do tubo de acesso do sensor e do volume de solo medido no campo em condições reais de funcionamento. A umidade do solo fornecida pela sonda Sentry 200-AP (Troxler Laboratories, Inc., Research Triangle Park, NC, USA), por exemplo, corresponde à umidade média num volume de solo de 25 cm de diâmetro por 10 cm de altura (LEY et al., 1992).

Os valores encontrados para os erros de repetibilidade, histerese, linearidade e acurácia estão dentro de uma faixa aceitável já que expressos em termos de umidade volumétrica representaram 0,396%, 0,226%, 0,029%, $\pm 0,283\%$, respectivamente, considerando uma amostra de solo cilíndrica de 30 cm de diâmetro e 25 cm de altura. Do conjunto de erros avaliados a repetibilidade foi o que mais contribuiu para a acurácia do sistema de pesagem, principal erro indicador da performance de um instrumento de medição. Isto implica em que o erro de acurácia do sistema foi em geral influenciado por fatores que não podem ser controlados pelo experimentador.

TABELA 3 – Características técnicas do sistema de pesagem

Parâmetro de Performance	Valor		
	Massa (g)	Percentual (% FE)*	Umidade volumétrica (%)**
Erro de repetibilidade	70,00	0,1186	0,396
Erro de histerese	40,00	0,0678	0,226
Erro de linearidade	5,14	0,0087	0,029
Acurácia	$\pm 50,00$	$\pm 0,0833$	$\pm 0,283$
Resolução	10,00	0,0170	0,057

*Final da escala

**Para uma amostra de solo cilíndrica de 30 cm de diâmetro e 25 cm de altura.



FIGURA 5 – Exemplo de monólito para calibração de sonda de capacitância

CONCLUSÕES

O sistema de pesagem proposto revelou-se funcional, prático e de baixo custo e adequado, com base nos parâmetros de desempenho, para utilização em processos de calibração de sensores de umidade do solo. A acurácia global do sistema de pesagem da ordem de ± 50 g é aceitável quando se necessita pesar massas de solo de grande volume, a exemplo das requeridas para calibração de sondas de capacitância.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COELHO FILHO, M. A.; VELLAME, L. M.; COELHO, E. F.; SOUZA, C. F. **Instalação e operação de sistemas de aquisição e armazenamento de dados para o monitoramento do sistema solo-planta-atmosfera.** Cruz das Almas, BA:EMBRAPA/CNPMPF, 2004. 136 p. (Documentos 143).

DEAN, T. J.; BELL, J. P.; BATY, A. J. B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. Part I. Sensor design and performance. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 93, p. 67-68. 1987.

GONÇALVES Jr., A. A. **Metrologia – Parte I** (Apostila). Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Mecânica. Laboratório de Metrologia e Automação. Florianópolis. 2004. 129 p.

GILBERTO Jr., O. J. **Desempenho do reflectômetro no domínio do tempo na detecção de variações de umidade do solo.** 2003. 94 p. Dissertação (Mestrado) – ESALQ, Piracicaba – SP.

GROENEVELT, P.H.; BOLT, G.H. Water retention in soil. New York, **Soil Science**, v. 113, n. 4, p. 238-245. 1971.

PALTINEANU, I.C.; STARR, J. L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. Madison, **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1576-1585, November-December, 1997.

LEY, T. W.; STEVENS, R. G.; TOPIELEC, R. R.; NEIBBLING, W. H. **Soil water monitoring and measurement.** Pacific Northwest Publication. Prosser: Washington State University, 1992, 27 p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo.** 2ª ed. Piracicaba: O próprio, 2000. 509 p.

WHEELER, A. J.; GANJI, A. R. **Introduction to engineering experimentation.** New Jersey: Prentice Hall, 1996. 415 p.

CAPÍTULO 2

CALIBRAÇÃO DE SENSORES FDR (Frequency Domain Reflectometry) PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO³

³ Artigo a ser ajustado para submissão ao Comitê Editorial do periódico científico Irriga – Revista Brasileira de Irrigação e Drenagem, Botucatu, São Paulo

CALIBRAÇÃO DE SENSORES FDR (Frequency Domain Reflectometry) PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO

RESUMO: Dos vários métodos existentes atualmente para determinação indireta da umidade do solo, a reflectometria no domínio da frequência, - FDR (frequency domain reflectometry) vem despertando muito interesse ultimamente, devido principalmente à possibilidade de leituras em tempo real e automatizadas. Este trabalho teve como objetivo calibrar em condições controladas (laboratório) e em campo duas sondas que tem como princípio de funcionamento a FDR. Este método baseia-se na constante dielétrica, que é a capacidade de um material não condutor em transmitir ondas ou pulsos eletromagnéticos de alta frequência. O trabalho de laboratório consistiu na retirada de monólitos de seis profundidades (10, 30, 50, 70, 90, e 110 cm) e após saturação eram medidas as suas umidades volumétricas (θ) e os valores correspondente do parâmetro D (unidade adimensional que expressa a variação da frequência da onda eletromagnética emitida pelos sensores) das duas sondas, obtendo-se pares ordenados em seguida foram ajustadas equações com $\theta = f(D)$. Na calibração de campo uma trincheira foi aberta e foram inseridos verticalmente dez tubos de acesso para as sondas, cinco em cada lado da trincheira distribuídos equidistantes. As leituras com as sondas foram realizadas nas mesmas profundidades dos trabalhos de laboratório e duas amostras indeformadas foram retiradas, para análise gravimétrica, em torno do tubo nas mesmas profundidades de leitura das sondas. Obteve-se pares ordenados (D e θ), em seguida ajustou-se modelos com $\theta = f(D)$. Os resultados mostraram que a calibração das sondas em condições controladas (laboratório) se mostrou mais adequada, pois apresentou melhores coeficientes de determinação em todas profundidades e que o modelo sugerido pelo fabricante na calibração de laboratório apresentou melhor desempenho que o linear.

PALAVRAS-CHAVE: conteúdo de água no solo, instrumento de medição, constante dielétrica.

ABSTRACT

KEY WORDS: soil water content, instrumentation, dielectric constant

CALIBRAÇÃO DE SENSORES FDR (Frequency Domain Reflectometry) PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO

INTRODUÇÃO

Em estudos relacionados à agricultura, a medição da quantidade de água existente no solo torna-se imprescindível para o sucesso da atividade. Segundo Cichota (2003), o conteúdo de água de um solo é um dos seus atributos mais importantes, e um dos mais variáveis. O deslocamento e ciclagem de vários elementos químicos, o desenvolvimento dos processos bioquímicos no solo, o crescimento das plantas e uma série de outras propriedades físicas do próprio solo como densidade, resistência à penetração, tensão de cisalhamento, etc., são significativamente influenciadas pelo teor de água.

Os métodos de determinação do conteúdo de água no solo são comumente classificados em métodos diretos, quando permitem determinar diretamente a umidade do solo, e indiretos, quando permitem estimar a umidade, principalmente, a partir de propriedades físicas do solo.

Os métodos diretos ou gravimétricos baseiam-se na pesagem de solo úmido e depois da secagem, que podem ser realizadas em estufa ou num forno microondas (GARDNER, 1986). A diferença entre as duas medidas representa a massa de água perdida pela amostra. Presume-se que esta proporção represente a condição do solo no momento da coleta da amostra. Com a quantificação destas massas determina-se a umidade gravimétrica do solo e caso a densidade do solo ou o volume da amostra também seja conhecida pode-se obter a umidade volumétrica. Este método é tido como padrão de medida do conteúdo de água no solo, por ser o mais simples e permitir diretamente a obtenção da umidade do solo. Apresenta, no entanto as desvantagens de ser demorado, destrutivo e de não permitir a repetição da amostragem no mesmo local (GILBERTO Jr, 2003).

Os métodos indiretos utilizam uma propriedade física do solo que é dependente da quantidade de água presente nele (GARDNER, 1986).

Segundo Cichota (2003), há vários processos e equipamentos que permitem a determinação indireta do teor de água no solo, como por exemplo, os

métodos elétricos (resistência ou a capacitância do solo), os métodos térmicos (condutividade térmica), os métodos radioativos (atenuação de nêutrons rápidos ou raios gama), a tensiometria (potencial matricial) e a reflectometria no domínio do tempo (constante dielétrica relativa), entre outras.

Segundo Ribeiro (2001), o desenvolvimento de sensores tem seguido os critérios de baixo requerimento de mão-de-obra, sem necessidade de amostragem destrutiva após a instalação e adaptabilidade à mensuração e gravação eletrônicas. Os sensores que preenchem esses critérios são os tensiômetros, as sondas de nêutrons, sensores de capacitância elétrica, sensores de resistência elétrica, sensores de dissipação de calor, reflectômetros no domínio do tempo (TDR) e reflectômetros no domínio da frequência (FDR).

A grande vantagem dos métodos indiretos e não destrutivos é a repetibilidade da leitura num mesmo ponto, pois após os equipamentos serem instalados permanecem utilizáveis por certo tempo, sem a necessidade de revolver o solo. Muitas vezes também podem ser automatizados. Porém as propriedades utilizadas por estes métodos não são unicamente dependentes do conteúdo de água do solo e quando a mineralogia, o teor de sais, a densidade ou a temperatura variam, a relação entre a resposta do aparelho e a umidade do solo pode ser alterada. O estudo de novos métodos ou aparelhos de medição e uma calibração bem feita são expedientes que proporcionam a aplicabilidade destes métodos (CICHOTA, 2003).

Dos vários métodos existentes, a reflectometria no domínio da frequência, - FDR (frequency domain reflectometry) vem despertando muito interesse, devido principalmente à possibilidade de leituras em tempo real e automatizadas. Contudo existem dois problemas principais: o custo elevado do equipamento, devido principalmente à eletrônica sofisticada e a necessidade de calibração. Neste último aspecto a pesquisa vem tentando encontrar uma relação entre a umidade do solo e a leitura do aparelho, porém nenhuma utilizável universalmente sem um procedimento de verificação.

É amplamente conhecido que as propriedades dielétricas são influenciadas pela umidade, o que não é diferente no caso das propriedades dielétricas do solo (HALLIKAINEN et al., 1985).

Nos últimos anos, têm sido estudadas técnicas para a determinação da umidade do solo mediante a medição da constante dielétrica do solo. A constante dielétrica é uma medida da habilidade de um material não condutor em transmitir pulsos ou ondas eletromagnéticas de alta frequência. Para um solo seco, a constante dielétrica normalmente varia de 2 a 5, enquanto para a água seu valor é em torno de 80 a frequências entre 30 MHz e 1 GHz (Ley et al., 1992; Troxler, 1995). Esta diferença indica que pequenas mudanças no conteúdo de água do solo podem ter grande influência sobre as propriedades eletromagnéticas do meio (LEY et al., 1992).

Os sistemas empregados para a determinação da umidade do solo mediante a medição da constante dielétrica do solo, são os sistemas TDR (Time Domain Reflectometry), cujo desenvolvimento se deu na década de 1980 através das publicações de Toop et al., 1980, e Dalton et al., 1984, e a sonda de capacitância que utiliza a técnica FDR (Frequency Domain Reflectometry), descrita por Dean et al., 1987.

Segundo Weinzettel & Usunoff (2003) a sonda de capacitância consiste em um par de eletrodos separados por um material dielétrico. Os eletrodos superior e inferior e o isolante separador são de forma cilíndrica, que se introduz em um tubo de acesso plástico instalado no solo. Um circuito de ressonância LC (L = indutância, C = capacitância) abrange o solo fora do tubo de acesso e o próprio tubo, mais o espaço de ar entre a sonda e o tubo de acesso como um dos elementos do capacitor. As trocas da frequência de ressonância do circuito dependem das trocas da capacitância do sistema solo-tubo de acesso. A diferença entre a frequência de ressonância da sonda no tubo de acesso na linha de base da frequência de ressonância é o valor D que é informado na unidade de leitura.(EVETT & STEINER, 1995; EVETT, 2000).

O volume de solo medido pela sonda independe do tipo de solo ou do conteúdo de água e aproxima-se ao de um cilindro de 10 cm de altura e 25 cm de diâmetro, assumindo ausência de bolsas de ar na profundidade lida. Uma vez calibrada, a medida do teor de umidade do solo fornecida pela sonda pode ser expressa em várias unidades entre elas % de volume, $\text{cm}^{-3}.\text{cm}^{-3}$ e mm/m (LEY et al., 1992).

As grandezas físicas são medidas por instrumentos para serem comparadas entre si ou a outras de interesse da pesquisa e para isso devem estar em conformidade com algum padrão, ou seja, as medições devem ser relativas a uma medida materializada ou um sistema de medição estabelecido (BARTHEM, 2005), este procedimento é chamado de calibração.

O processo de calibração consiste basicamente na coleta de dados (leituras) do aparelho ou sistema a ser calibrado; da coleta dos respectivos valores de referência e da análise da relação entre eles. Esta análise fornece a relação matemática ou estatística entre o valor de referência e a leitura do dispositivo calibrado, em adição, e talvez mais importante ainda, fornece a estimativa dos erros de medição. Erro é entendido como a diferença do valor medido para o valor real, que não pode ser conhecido e cuja estimativa é feita com base no valor de referência (VUOLO, 1999). A quantificação dos erros possibilita estimar a incerteza atribuível à medição, ou seja, caracterizar a dispersão dos valores medidos atribuível ao mensurado (VUOLO, 1999).

O objetivo deste trabalho é calibrar em condições de laboratório e de campo, duas sondas FDR.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi dividido em duas fases, a primeira consistiu na calibração das sondas em laboratório e a segunda na calibração em campo. Para execução da pesquisa foram usados basicamente os seguintes materiais: duas sondas de capacitância Sentry 200-AP (*Troxler Electronic Laboratories, Inc., Research Triangle Park, NC, USA*), dez tubos de PVC rígido (60 mm DE e 55 mm DI e comprimento de 150 cm), trado para retirada de amostras indeformadas de solo, recipientes de alumínio para acondicionamento das amostras de solo, estufa de circulação forçada de ar para secagem das amostras, balança analítica de precisão capacidade 4000 g, moldes de aço (altura 30 cm e diâmetro 30 cm), para obtenção de monólitos e um sistema de pesagem digital com capacidade de 60 kg.

Descrição e modo de operação dos sensores

As sondas utilizadas neste trabalho (Figura 1) são compostas basicamente de unidade de controle, cabo com parafusos, tubo guia com mecanismo de retenção do cabo através dos parafusos e o sensor cilíndrico contendo um par de eletrodos.

Ao cabo estão conectados parafusos cuja posição é ajustada de acordo com a profundidade de medição. Pelo modo de operação, o sistema permite ao usuário facilmente determinar o conteúdo de umidade do solo a várias profundidades abaixo da superfície de maneira rápida e precisa (TROXLER, 1995; LEY et al., 1992). Para a leitura da umidade do solo o sensor é inserido num tubo de acesso de PVC, previamente instalado. Quando uma medida é feita ocorre um desvio entre as frequências das ondas emitidas e recebidas, sendo esta alteração detectada pelo sensor e correlacionada com a constante dielétrica do solo para determinação da umidade àquela profundidade.



FIGURA 1 – Vista das sondas e unidade de controle

Segundo Ley et al. (1992), a instalação do tubo de acesso requer extremo cuidado para garantir perfeita aderência entre o solo e a sua parede externa. A

ocorrência de bolsas de ar entre ambas as superfícies resulta em leituras errôneas da umidade do solo. A distância entre a última profundidade de leitura e a extremidade inferior do tubo deve ser no mínimo de 15 cm.

Modelos de calibração

A calibração de fábrica da sonda, fornecida pelo fabricante é recomendada para solos arenosos, apresentando, portanto, limitações para uso em outros tipos de solo (LEY et al., 1992). Entre as alternativas de uso da sonda para outros tipos de solo está a compensação da calibração de fábrica ou a realização de nova calibração. Esta última foi a alternativa adotada neste trabalho.

Segundo o fabricante dois modelos matemáticos podem ser utilizados para calibração das sondas, ou seja, o modelo exponencial e o linear (TROXLER, 1995). As equações 1 e 2, respectivamente, apresentam os referidos modelos.

$$\theta = \frac{1}{F_1} \cdot \text{Ln} \left[\frac{(D - F_2)}{F_0} \right] \quad (1)$$

$$\theta = A_0 + A_1 \cdot D \quad (2)$$

onde θ é a umidade do solo na base de volume (%); D é o desvio de frequência (adimensional) e F_0 , F_1 , F_2 , A_0 e A_1 são os coeficientes de ajuste.

Primeira Fase – Calibração no Laboratório

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Irrigação e Drenagem, do Núcleo de Engenharia de Água e Solo, do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais da Universidade Federal da Bahia, campus de Cruz das Almas (12°40'S, 39°30'W), Bahia.

Obtenção das amostras

Amostras indeformadas de solo foram retiradas na mesma área que se utilizou para coleta de dados na fase de campo. Estas amostras consistiram de monólitos de tamanho de 25 cm de altura e 30 cm de diâmetro, respeitando a abrangência do volume de solo medido pelos sensores, conforme Ley et al. (1992), correspondendo a um cilindro de 10 cm de diâmetro e 25 cm de altura.

Para retirada dos monólitos foram confeccionados seis moldes em aço resistente, nas dimensões de 30 cm de diâmetro e 30 cm de altura (Figura 2).



FIGURA 2 – Molde para retirada de monólito

Na parte inferior dos moldes foram instaladas bases móveis de zinco com 40 cm de diâmetro e bordas de 5 cm de altura, perfeitamente vedadas, e que foram fixadas através de garras na parte superior. Estas bases tinham a função de promover a retenção do solo no interior do molde, evitando perdas no transporte e calibração do sensor.

A cada profundidade de calibração (10, 30, 50, 70, 90 e 110 cm) foram extraídos três monólitos representativos. Antes da extração, um segmento de PVC (60 mm DE e 55 mm DI) de 30 cm de altura foi inserido no solo, como mostra a Figura 3, para acesso do sensor de umidade.

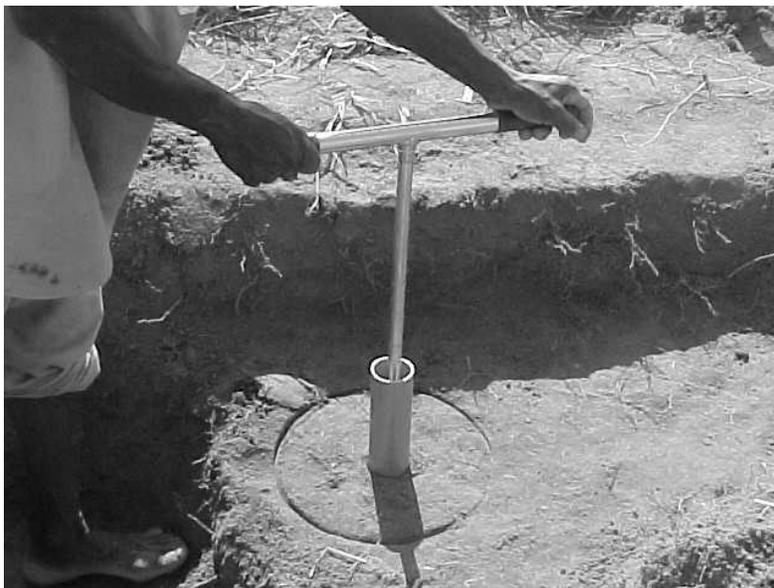


FIGURA 3 – Inserção e tradagem do tubo de acesso, para posterior retirada do monólito

A esta etapa seguiu-se à retirada dos monólitos para serem levados ao laboratório. À medida que o molde era inserido no perfil, o solo no lado externo era gradativamente retirado de forma a facilitar a inserção de molde no perfil. Finda a inserção, o solo na extremidade inferior do molde foi seccionado para fixação da base metálica (Figura 4).



FIGURA 4 – Monólito com tubo de acesso instalado e detalhe de fixação da base metálica.

Análise laboratorial

A análise laboratorial teve como base o princípio gravimétrico. A leitura de umidade nas amostras, iniciou-se a partir de uma condição de saturação, e eram feitas diariamente. Imediatamente após cada leitura com o sensor procedia-se a pesagem do conjunto (molde + tubo + solo + base). Foram trabalhadas duas profundidades por vez, através de seis monólitos, sendo três repetições por profundidade do perfil. As profundidades de 10 e 30 cm foram as primeiras a serem trabalhadas. O peso de cada molde com a respectiva base e o peso de cada segmento de tubo de acesso foram previamente medidos para fins de gravimetria.

As pesagens dos monólitos foram realizadas através de um sistema de pesagem calibrado para este fim, como mostra a Figura 5.



FIGURA 5 – Vista geral do sistema de pesagem (monólito sobre a plataforma com uma sonda inserida para leitura e módulo indicador à direita)

As características técnicas do sistema de pesagem utilizado estão descritas na Tabela 1.

TABELA 1 – Características técnicas do sistema de pesagem

Parâmetro de Performance	Valor		
	Massa (g)	Percentual (% FE)*	Umidade volumétrica (%)**
Erro de repetibilidade	70,00	0,1186	0,396
Erro de histerese	40,00	0,0678	0,226
Erro de linearidade	5,14	0,0087	0,029
Acurácia	±50,00	±0,0833	±0,283
Resolução	10,00	0,0170	0,057

*Final da escala

**Para uma amostra de solo cilíndrica de 30 cm de diâmetro e 25 cm de altura.

As leituras de umidade numa dada amostra, a partir da saturação, eram feitas ao ar livre e prosseguiam até peso praticamente constante do conjunto, o que indicativa baixo teor de umidade na amostra. O objetivo era calibrar o sensor numa ampla faixa de variação de umidade do solo, ou seja, da saturação ao nível mais baixo possível de umidade. Atingido este limite inferior de umidade, os monólitos eram desfeitos e três amostras retiradas de cada monólito (nove por profundidade) e levadas à estufa a 105 °C por 24 horas para determinação da umidade gravimétrica remanescente. Com a determinação da umidade remanescente, foi possível calcular a umidade volumétrica do solo por ocasião das leituras com o sensor, dada pela relação entre o volume de água e o volume

de solo no monólito. Após estas determinações obteve-se os pares ordenados (D, θ) para calibração da sonda conforme os modelos anteriormente apresentados (Equação 1 e 2).

Segunda Fase – Calibração no Campo

Os trabalhos de campo foram realizados na área do Campo Experimental do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais da Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas, Bahia (220 m; 12°40'39"S; 39°06'23"W). A caracterização física das amostras de solo está apresentado na Tabela 2.

TABELA 2 – Características físicas das amostras de solo utilizadas

Profundidade (cm)	Teores (g kg ⁻¹)			Classificação textural	Densidade de partículas (kg dm ⁻³)
	Argila	Silte	Areia total		
10	195	82	723	Franco arenoso	2,51
30	284	59	657	Franco argilo arenoso	2,51
50	352	69	579	Argila arenosa	2,54
70	318	93	589	Franco argilo arenoso	2,62
90	307	66	627	Franco argilo arenoso	2,55
110	405	94	501	Argila arenosa	2,76

Fonte: Laboratório de Física do Solo da EMBRAPA Mandioca e Fruticultura.

Instalação e disposição dos tubos de acesso

Os procedimentos de calibração de campo seguiram metodologia proposta por Evett & Steiner (1995). Na área experimental foram instalados dez tubos de PVC rígido, com as dimensões de 60 mm DE e 55 mm DI e comprimento de 150 cm, para acesso dos sensores. Os tubos foram divididos em dois grupos de cinco, enfileirados paralelamente e equidistantes 100 cm ao longo da fileira. Centralizada entre as fileiras foi aberta uma trincheira na direção norte-sul, de 100 cm de largura por 500 cm de comprimento e 150 cm de profundidade, de tal forma

que os tubos de uma mesma fileira ficassem a 50 cm da respectiva parede da trincheira (Figura 6). Cada um dos lados da trincheira foi preparado de forma a se permitir a calibração da sonda numa ampla faixa de variação de umidade. Assim, um dos lados constituiu-se no perfil úmido e o outro no perfil de solo seco.



FIGURA 6 - Vista parcial da trincheira utilizada, com os tubos de acesso instalados

Os procedimentos para instalação dos tubos de acesso seguiram as recomendações do fabricante das sondas (TROXLER, 1995), conforme mostra a Figura 7.



FIGURA 7 – Instalação de um tubo de acesso

Para garantir boa aderência entre o solo e a parede externa do tubo durante a instalação e evitar bolsas de ar, o solo era trado do interior do tubo ao tempo em que o mesmo era inserido verticalmente com o auxílio de um martelo de borracha, tendo sua extremidade inferior biselada. Ao final da instalação a extremidade superior do tubo ficou a cinco cm acima da superfície do solo. Para a retirada do solo que por ventura ficava aderido à parede interna dos tubos, foi efetuada a limpeza dos mesmos com uma esponja. As leituras e as amostragens foram efetuadas após um mês da instalação dos tubos, tempo necessário para se garantir a adequada aderência do solo à parede externa do tubo.

O perfil do solo em ambos os lados da trincheira foi dividido arbitrariamente em seis camadas de 20 cm de espessura. As leituras de umidade com as sondas foram realizadas no ponto médio de cada camada (10, 30, 50, 70, 90 e 110 cm), sendo a leitura àquela profundidade tomada como representativa da respectiva camada. Após o encerramento das leituras em um dado tubo de acesso, a parede do solo em frente ao mesmo foi reduzida de forma a expor o tubo e facilitar a trado horizontal em todas as profundidades (Figura 8). A exposição parcial do tubo de acesso teve por objetivo investigar a existência de possíveis bolsas de ar na profundidade de leitura do sensor.



FIGURA 8 – Vista da retirada das amostras indeformadas

No perfil de solo úmido, após a leitura com a sonda exposição do tubo de acesso pela redução da parede da trincheira, amostras de solo informadas foram

obtidas, sendo duas amostras por profundidade. As mesmas foram utilizadas para tanto para determinação da densidade aparente do solo quando para a determinação do teor de umidade na profundidade lida pelo sensor. No perfil seco, amostras indeformadas de solo não puderam ser obtidas segundo o mesmo procedimento. Optou-se então por obter num primeiro momento amostras deformadas para gravimetria e após umedecimento do perfil, num segundo momento, obteve as amostras indeformadas para determinação da densidade do solo. A Figura 9 ilustra o processo de amostragem num dos tubos de acesso do sensor de umidade, até a profundidade de 110 cm. As amostras de solo, após determinações de laboratório, forneceram os pares ordenados (D, θ) para calibração dos sensores, conforme as Equações 1 e 2.

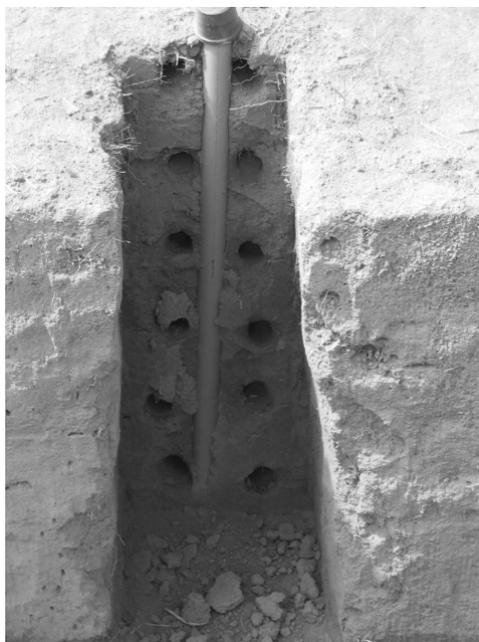


FIGURA 9 – Vista do tubo de acesso, com a retirada das amostras em todas profundidades

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração em laboratório

As Figuras 10 e 11 mostram as umidades observadas e ajustadas (θ) em função dos valores D fornecidos pelas sondas capacitância. Os parâmetros de ajuste (F_0 , F_1 e F_2) do modelo exponencial (Equação 1) foram otimizados utilizando-se o método dos mínimos quadrados para cada profundidade. Os parâmetros de ajuste são mostrados nas Tabelas 7 e 8. O resultado da calibração para o modelo linear (Equação 2) é mostrado para ambas as sondas e em todas as profundidades na Tabela 3.

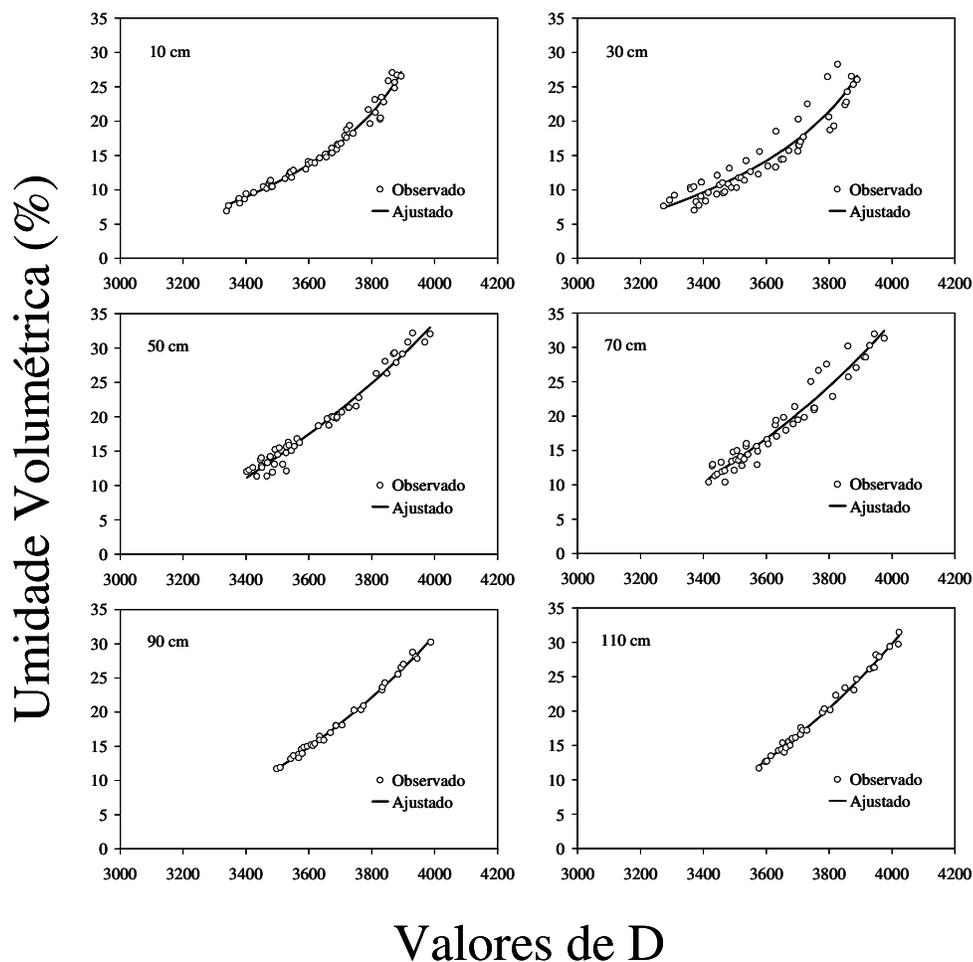


FIGURA 10 – Umidades volumétricas em função dos valores D para a sonda 1.

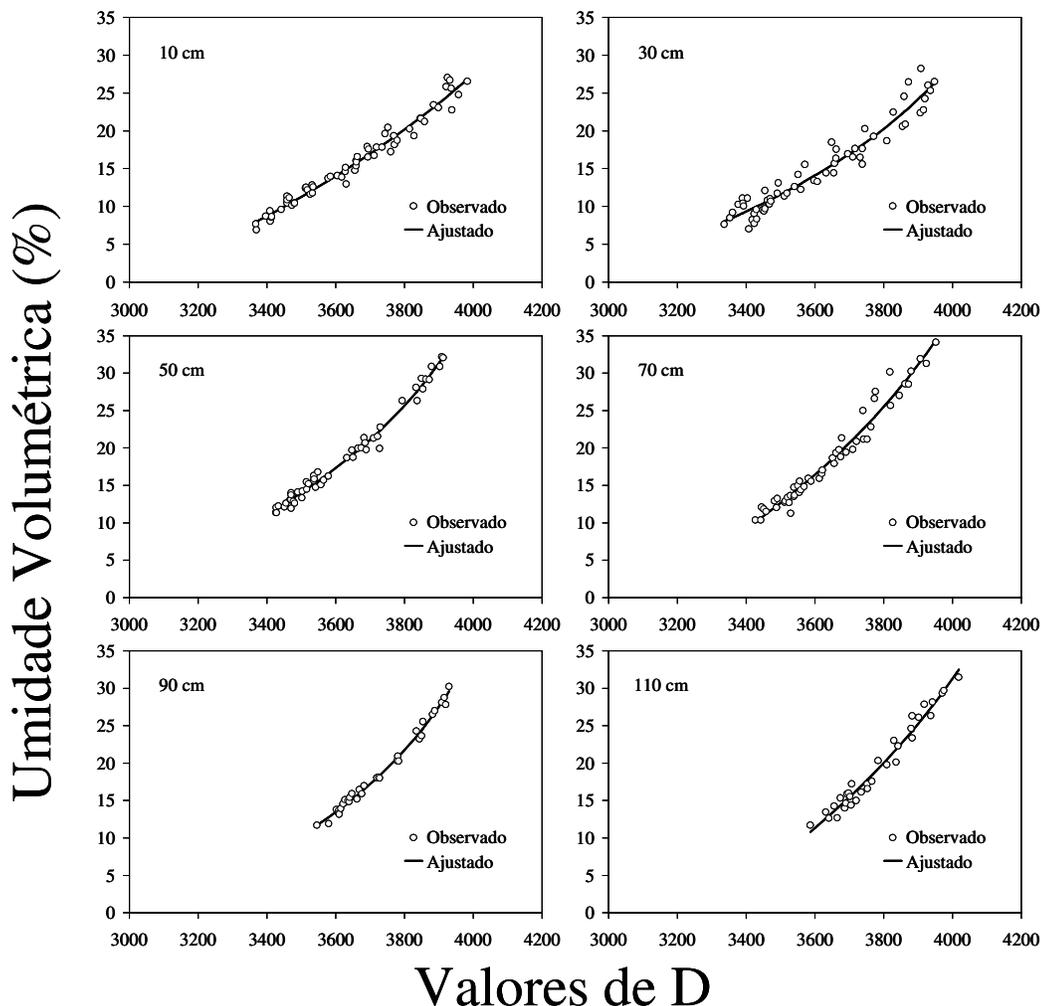


FIGURA 11 - Umidades volumétricas em função dos valores D para a sonda 2.

TABELA 3 – Coeficientes de ajuste e de determinação do modelo linear de calibração, para ambas as sondas em todas as profundidades.

Parâmetros de ajuste e		Profundidade (cm)					
coeficiente de	Sonda	10	30	50	70	90	110
determinação							
A_0	1	-94,94 a	-94,18 a	-115,31 a	-123,88 a	-122,88 a	-141,54 a
	2	-94,83 a	-94,39 a	-129,89 a	-148,80 b	-155,17 b	-175,43 b
A_1	1	0,0304 a	0,0304 a	0,0370 a	0,0400 a	0,0380 a	0,0428 a
	2	0,0303 a	0,0303 a	0,0411 b	0,0460 b	0,0467 b	0,0515 b
R^2	1	0,900 a	0,909 a	0,977 a	0,980 a	0,993 a	0,993 a
	2	0,973 b	0,971 b	0,986 a	0,974 a	0,985 a	0,992 a

Obs.: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A Figura 12 mostra a relação entre a umidade volumétrica estimada pelos dois modelos e a medida, para todas as profundidades. Os afastamentos dos coeficientes angulares e lineares dos valores ideais (1 e 0, respectivamente) fornecem idéia dos erros sistemáticos no processo de calibração, já que os valores do coeficiente de determinação indicam a precisão do modelo, através da dispersão dos dados. Nota-se na Figura 12 que o modelo sugerido pelo fabricante (modelo exponencial) apresentou melhor ajuste.

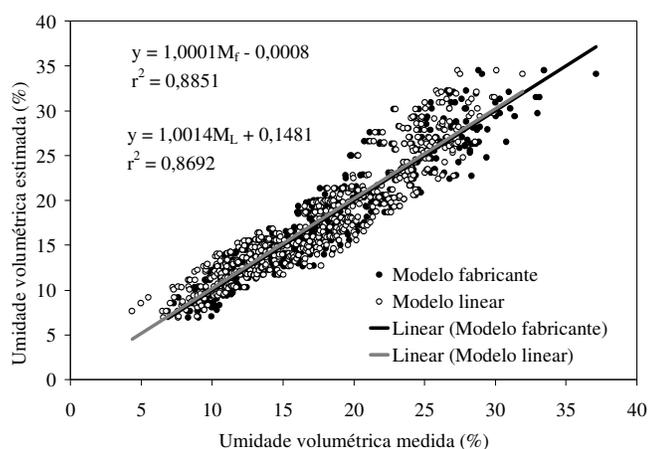


FIGURA 12 – Regressão entre a umidade volumétrica estimada por ambos os modelos de calibração e a umidade volumétrica derivada dos monólitos.

Com o objetivo de verificar divergências de medidas nas sondas em estudo, foram testadas as médias dos coeficientes da função linear, para cada profundidade analisada, conforme a metodologia sugerida por Coelho et al. (2003). A Tabela 3 mostra que em diversas profundidades houve diferença significativa entre os parâmetros da função, através do teste de Tukey ($\alpha=0,05$), quando os valores de D foram medidos pelas sondas, indicando a necessidade de calibrações individualizadas para cada uma delas. Deduz-se portanto, que equações que levem em consideração parâmetros físicos, como os sugeridos por ROTH et al. (1990), que consideram a constante dielétrica aparente como uma resultante de componentes da matriz do solo, do ar e da água, não serão eficientes para este tipo de equipamento. Estas divergências nas medidas das sondas estão evidenciadas na Figura 13.

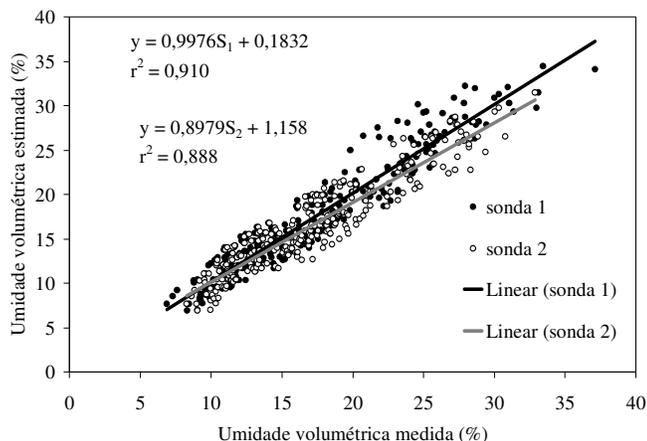


FIGURA 13 – Umidade medida em função da estimada, pelas medidas D das sondas analisadas

Ao se correlacionar valores estimados com os medidos, por ambos modelos de calibração, foram considerados os seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de determinação (r^2), indicador de precisão e índice de Wilmott (d), como indicador de exatidão.

Segundo Camargo & Sentelhas (1997) a precisão é dada pelo coeficiente de determinação que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, ou seja, o erro aleatório. A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente essa aproximação é dada por um índice designado de concordância (WILLMOT et al., 1985). Seus valores variam de zero, para ausência de concordância, a 1, para concordância perfeita.

As Tabelas 5, 6, 7 e 8 mostram os coeficientes de ambos os modelos de calibração (Equação 1 e 2) com indicação dos coeficientes de determinação e de concordância, bem como o erro máximo, para ambas as sondas das em todas profundidades analisadas. Nota-se que os erros máximos verificados, estão bem maiores que os encontrados nas características técnicas do sistema de pesagem, o que denota a excelente confiabilidade dos dados fornecidos pelo sistema de pesagem.

TABELA 5 - Parâmetros da regressão linear para a sonda 1

Profundidade (cm)	A ₀	A ₁	r ²	d	Emáx (%)
10	-105,42	0,0333	0,947	0,986	3,76
30	-85,26	0,0279	0,850	0,959	6,73
50	-114,18	0,0367	0,968	0,992	3,20
70	-118,03	0,0375	0,941	0,984	2,98
90	-122,06	0,0382	0,992	0,995	1,46
110	-140,47	0,0425	0,992	0,997	1,36
Todas	-107,36	0,0342	0,892	0,966	6,27

TABELA 6 - Parâmetros da regressão linear para a sonda 2

Profundidade (cm)	A ₀	A ₁	r ²	d	Emáx (%)
10	-90,45	0,0291	0,969	0,991	3,27
30	-84,70	0,0276	0,904	0,978	5,05
50	-127,37	0,0404	0,976	0,995	1,36
70	-143,96	0,0447	0,959	0,989	2,56
90	-155,16	0,0467	0,982	0,995	1,87
110	-168,33	0,0497	0,965	0,991	2,18
Todas	-94,69	0,0305	0,877	0,966	4,40

TABELA 7 - Parâmetros do modelo proposto pelo fabricante para a sonda 1

Profundidade (cm)	F ₀	F ₁	F ₂	r ²	d	Emáx (%)
10	-1308,92	-0,0774	4054,16	0,980	0,995	2,37
30	-1408,58	-0,0774	4068,83	0,900	0,973	5,48
50	-1993,50	-0,0212	4975,26	0,974	0,993	2,99
70	-1735,58	-0,0258	4727,30	0,946	0,986	2,85
90	-1655,00	-0,0278	4694,92	0,995	0,999	0,95
110	-1584,05	-0,0253	4745,65	0,991	0,998	1,17
Todas	-1529,53	-0,0395	4435,31	0,910	0,976	5,69

TABELA 8 - Parâmetros do modelo proposto pelo fabricante para a sonda 2

Profundidade (cm)	F ₀	F ₁	F ₂	r ²	d	Emáx (%)
10	-1937,23	-0,0262	4941,23	0,972	0,993	2,47
30	-1537,48	-0,0477	4385,28	0,936	0,983	3,68
50	-1394,23	-0,0426	4267,51	0,987	0,997	1,26
70	-1396,66	-0,0287	4471,71	0,967	0,992	2,46
90	-1167,28	-0,0481	4210,98	0,991	0,998	1,04
110	-1327,46	-0,0259	4589,27	0,970	0,992	2,01
Todas	-1529,08	-0,0449	4419,58	0,880	0,969	6,01

CALIBRAÇÃO DE CAMPO

Equações de calibração com os dados de campo foram obtidas e ajustadas para os modelos exponencial e linear (Equações 1 e 2) e comparadas. Esta análise é apresentada na Tabela 9 e Figuras 16 e 17. Nota-se que as sondas obtiveram baixo desempenho para a metodologia de calibração em campo, pois o grau de dispersão dos dados em relação à média foi grande, como evidencia os coeficientes de determinação, diferente portanto do que ocorreu com a calibração de laboratório. Segundo Weinzettel & Usunoff (2003) este comportamento pode ser atribuído à variabilidade do solo, ao trabalho realizado em condições não controladas, a pequena amplitude das amostras e a metodologia de retirada das amostras indeformadas.

TABELA 9 – Parâmetros de ajuste dos modelos de calibração exponencial e linear a partir dos dados de campo, para ambas as sondas e todas as profundidades.

Sonda	F ₀	F ₁	F ₂	r ²	A ₀	A ₁	r ²
1	-3768,72	-0,03093	6127,58	0,492	-34,754	0,0132	0,503
2	-2585,44	-0,05170	4885,21	0,413	-46,071	0,0165	0,428

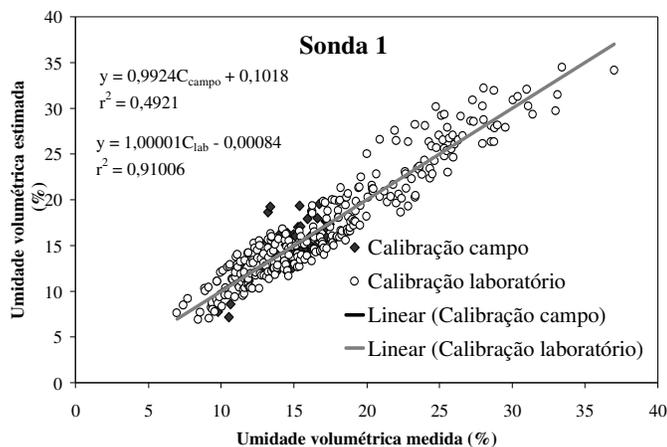


FIGURA 16 – Comparação das equações lineares de calibração em campo e laboratório para sonda 1.

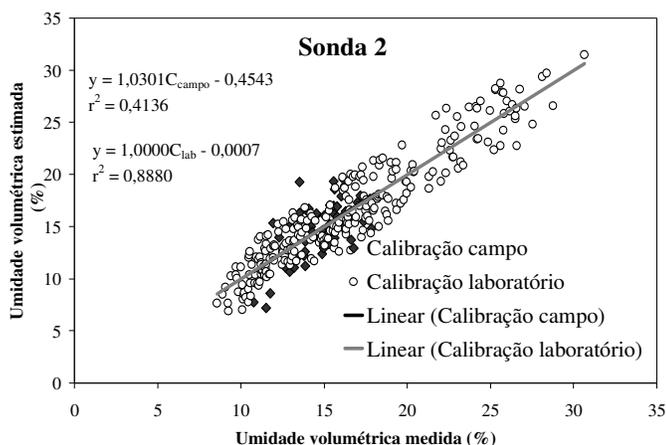


FIGURA 17 – Comparação das equações lineares de calibração em campo e laboratório para sonda 2.

CONCLUSÕES

A calibração das sondas em condições controladas (laboratório) se mostrou mais adequada, pois apresentou melhores coeficientes de determinação em todas as profundidades.

A calibração das sondas em campo não apresentou resultados satisfatórios, quando comparada a calibração de laboratório.

O modelo exponencial na calibração de laboratório apresentou melhor desempenho que o linear.

Apesar das sondas analisadas serem do mesmo modelo e fabricante, estas possuem características intrínsecas que não permitem a mesma calibração em condições de laboratório.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BARTHEM, R. **Vocabulário de metrologia legal**. Instituto de Física – UFRJ. Disponível em <<http://www.if.ufrj.br/metrologia>. Acessado em 12/01/05.

CAMARGO, P. DE C., SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CICHOTA, R. **Avaliação no campo de um TDR segmentado para determinação da umidade do solo**. Dissertação (Mestrado). ESALQ. Piracicaba. 2003. 121 p.

COELHO, F. E.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, A. M.; SANTOS, M. R.; LEDO, C. A. S. **Calibração de dois tipos de sondas de TDR acopladas ao testador de cabos e a multiplexadores em três tipos de solo**. In: XIII CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e drenagem, 2003. Juazeiro, BA. 2003.

DALTON, F., HERKELRATH, W., RAWLINS, D.; RHOADES, J. Time domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. **Soil Science**, New York, v. 224, p. 989-990, 1984.

DEAN, T., BELL, J., BATY, J. Soil moisture measurement by improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 93, p. 67-78, 1987.

EVETT, S.R.. **Some aspects of time domain reflectometry, neutron scattering, and capacitance methods for soil water content measurement. In Comparison of soil water measurement using the neutron scattering, time domain reflectometry and capacitance methods**. International Atomic Energy Agency, 2000. IAEA-TECDOC – 1137. 163 p.

EVETT, S.R.; STEINER, J. L. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n.4, p. 961-968, July-August, 1995.

GARDNER, W. H. water content. In KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis I, physical and mineralogical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. cap. 21. p. 493-594.

GILBERTO Jr., G.O.J. **Desempenho do reflectômetro no domínio do tempo na detecção de variações de umidade do solo**. Piracicaba, 2003. 94p. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz da Queiroz”, Universidade de São Paulo.

HALLIKAINEN, M.T.; ULABY, F.T.; DOBSON, M.; EL-RAYES, M.A.; WU, L. Microwave dielectric behavior of wet soil – Part I: Empirical models and experimental observations. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v.23, n.1, p. 25-34, 1985.

HIGNETT, C.T. **Factors affecting the selecting of a soil water sensing technology**. In: **International Atomic Energy Agency. Comparison of soil water measurement using the neutron scattering, time domain reflectometry and capacitance methods**. Viena: IAEA, 200. p. 51-64.

LEY, T.W.; STEVENS, R.G.; TOPILEC, R.R.; NEIBBLING, W.H. **Soil water monitoring and measurement**. Pacific Northwest Publication. Prosser, WA: Washington State University, 1992, 27 p.

RIBEIRO, RSF. **Irrigação de precisão**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., Foz do Iguaçu, 2001. Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. CD-ROM.

ROTH, C. H.; SCHULIN, R.; FLUHLER, H.; ATTINGER, W. Calibration of time-domain reflectometry for water content measurement using composite dielectric approach. **Water Research**, Washington, v. 26. n. 10. p. 2267-2273. 1990.

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

TROXLER ELECTRONIC LABORATORIES. **Sentry 200-AP user's manual for operation and instruction**. Research Triangle Park, NC. 1995. 75p.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria dos erros**. 2ª ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1996. 249p.

VUOLO, J. H. Avaliação e expressão de incertezas em medição. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 21, n.3, p. 350-358, 1999.

WEINZETTEL, P.; USUNOFF, E. **Calibración de una sonda de capacitancia en suelos argiudoles de la zona central de la provincia de BS. AS.**, Argentina. Estudios de la zona no saturada del solo. Vol. VI. Instituto de Hidrología de Llanuras. J. Alvarez-Benedi y P. Marinero, 2003. Buenos Aires – Argentina.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A prática da irrigação é muito antiga. Na verdade, a Bíblia e a História já registraram o uso da irrigação pelas mais antigas das civilizações. Por esses registros antigos, supõe-se que a irrigação tenha saído feita de modo muito simples e prático, embora muita vezes envolvesse obras de grande porte para o represamento da água.

Nas últimas décadas, diferentes métodos de irrigação foram aperfeiçoados sendo amplamente usados em diversos países. No Brasil, só mais recentemente, ou seja, a partir dos anos 50, é que a técnica de irrigação vem desenvolvendo-se como prática baseada em dados científicos.

Assim, qualquer técnica de irrigação deve partir de três pontos básicos: como, quanto e quando irrigar. Em outras palavras, a água deve ficar à disposição da planta de maneira adequada, na quantidade certa e na ocasião em que ela necessitar.

Dessa forma, a principal função da irrigação seria repor a água perdida pela evaporação e pela transpiração das plantas.

Neste sentido a quantificação da água existente no solo é indispensável para o manejo adequado dos sistemas de irrigação, otimizando assim a utilização dos recursos hídricos e conseqüentemente aumentando a rentabilidade das atividades que utilizem à irrigação.

Sendo assim, a estimativa da umidade do solo pela técnica da FDR (frequency domain reflectometry) se encere neste contexto como uma alternativa viável de manejo da irrigação, por apresentar características que possibilitam sua utilização a partir de uma calibração como a realizada neste trabalho.

Espero que este trabalho tenha contribuído de alguma forma para a melhoria das técnicas de manejo da irrigação e que sirva de base para futuros trabalhos que abranjam a utilização da FDR (frequency domain reflectometry).