



II WORKSHOP DE APLICAÇÕES DE TÉCNICAS ELETROMAGNÉTICAS PARA O MONITORAMENTO AMBIENTAL



ASPECTOS PRÁTICOS NA UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE CAPACITÂNCIA: DESAFIOS E APRENDIZAGEM

Prof. Dr. Cláudio Ricardo da Silva, UFPI.

Cláudio Ricardo da Silva¹; Anderson Soares de Andrade Júnior²; Claudinei Fonseca Souza³

1. Introdução

Há diversos métodos que quantificam o teor da água do solo. O método gravimétrico é considerado o método direto padrão. Os métodos indiretos são aqueles que estimam o teor de água no solo a partir de outras propriedades do solo. A desvantagem deste método é que requerem calibrações locais para aumentar sua precisão nas medidas, mas nos estudos de monitoramento da água do solo são ideais, devido à praticidade, rapidez e repetibilidade nas medidas feitas em um determinado ponto do perfil do solo.

Dentre os métodos indiretos, os baseados na constante dielétrica do solo (K), os mais utilizados são o de reflectometria no domínio do tempo (TDR) e frequência no domínio do tempo (FDR) ou técnica por capacitância. Estes métodos têm sido utilizados na pesquisa, em função da sua precisão, facilidade de acoplamento a um sistema de coleta de dados, rapidez e segurança ao operador. Apesar de ambos os métodos se basearem na medida de K, cada método apresenta características específicas que resultam em algumas vantagens e desvantagens ao usuário final.

Recentes avanços na microeletrônica têm proporcionado a popularização das sondas por capacitância para o monitoramento, “in loco”, do teor de água no solo. As sondas têm sido utilizadas em uma ampla variedade de solos na Austrália (Fares et al., 2004), Estados Unidos (Baumhardt et al., 2000; Fares e Alva, 2000) e Espanha (Girona et al., 2002).

Segundo Starr & Partineanu (1998) as sondas por capacitância apresentam erro padrão muito próximos às sondas TDR (0,02 a 0,005 m³m⁻³); possibilitam monitorar o teor da água no solo a uma distância de até 500 m entre o sistema de coleta de dados e o sensor

¹ Eng. Agr., Dr., Professor Adjunto – UFPI, Campus de Bom Jesus, PI. e-mail: claudio@ufpi.edu.br

² Eng. Agr., Dr., Pesquisador Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI. Bolsista PQ-CNPq.

³ Eng. Agr., Dr., Professor, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UNITAU, Taubaté, SP.

enquanto que no TDR o comprimento máximo do cabo é de 25m; os tubos de acesso são mais fáceis de instalar comparativamente a instalação das hastes do TDR para monitorar a umidade no perfil do solo, a qual exigiria a abertura de trincheira. Porém, são mais susceptíveis aos efeitos da salinidade do solo e temperatura (Baumhardt et al, 2000).

Atualmente, o principal fabricante de sondas por capacitância é a empresa australiana Sentek Pty Ltd⁴, que no seu portfólio de produtos, inclui a multisonda semi-portátil enviroSCAN e a sonda portátil Diviner 2000.

O objetivo deste trabalho é apresentar os aspectos técnicos da sonda capacitiva; revisar os principais resultados obtidos em trabalhos publicados em periódicos e, por fim, relatar a nossa experiência com a sonda Diviner 2000, que tem sido utilizada nas áreas experimentais da Embrapa Meio-Norte, a qual foi inicialmente calibrada em campo para dois tipos de solo presentes na unidade.

2. Princípio de funcionamento

2.1 Considerações sobre materiais dielétricos, constante dielétrica (K) e capacitores

Dielétricos ou isolantes são materiais que não conduzem ou conduzem muito pouco corrente elétrica. Na prática, os materiais dielétricos são sólidos, por exemplo, porcelana (cerâmica), mica, vidros, plásticos e óxidos de vários metais, mas mesmo líquidos e gases podem servir como bons materiais isoladores.

Apesar de conduzirem pouca corrente elétrica, materiais dielétricos contendo moléculas polares (e.g. água), quando sob a ação de um campo elétrico sofrem polarização, resultando em uma redistribuição e alinhamento das cargas no dielétrico.

Camadas de dielétricos são comumente incorporadas em capacitores para melhorar seu desempenho com relação aos capacitores que contém apenas ar ou vácuo entre suas placas. Ao se colocar um material dielétrico bipolar entre as placas em um capacitor de placas paralelas ocorre um incremento na capacitância (expressa pela quantidade de energia elétrica acumulada para uma dada tensão de voltagem). Isto ocorre porque um campo elétrico polariza as moléculas do dielétrico, produzindo concentrações de carga em sua superfície. Desta forma, ocorrerá um aumento da carga no capacitor (Figura 1).

⁴ Referências a marca e modelo do equipamento não constituem endosso por parte dos autores.

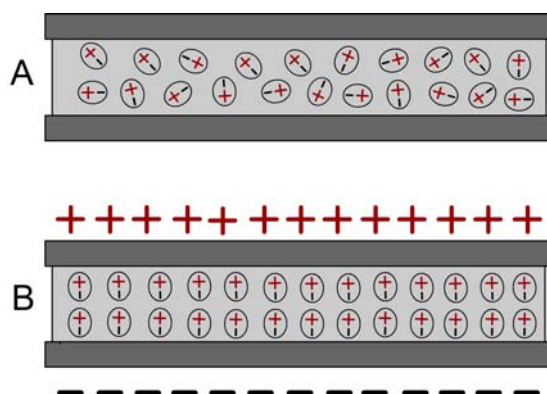


Figura 1. Esquema ilustrativo da distribuição desordenada das moléculas bipolares (e.g. água) em um dielétrico qualquer (A) e após a polarização (B). Note o ordenamento e o conseqüente aumento de cargas próximo às duas placas do capacitor.

Os materiais dielétricos variam quanto a sua capacidade de ser polarizado por um campo elétrico. Isto é descrito pela permissividade do meio (ϵ). No vácuo, considera-se como total.

A constante dielétrica (K) é um índice que expressa a permissividade do meio em relação a permissividade do vácuo (ϵ_0). Portanto, $K = \epsilon/\epsilon_0$. Logo para o vácuo, $K = 1$.

Para o ar, K é praticamente igual a do vácuo, ou seja igual a um, para um solo seco, K normalmente varia de dois a cinco, enquanto para água seu valor é de aproximadamente 81. No solo, a constante K medida neste sistema ou matriz (ar-solo-água) é denominada de constante dielétrica aparente (K_a). Assim, dado a grande diferença no valor de K_a com a presença de água no sistema, conhecendo-se esta variável pode-se determinar a umidade volumétrica do solo indiretamente.

2.2 Sondas capacitivas (Diviner 2000 e EnviroSCAN)

Basicamente, a sonda Diviner 2000 é constituída de um par de anéis metálicos (eletrodos) que funciona como parte de um capacitor eletrônico. Quando ativado, a matriz solo-água-ar forma o meio dielétrico deste “capacitor”. Desde que a área dos anéis e a distância entre eles são fixas na sonda, a capacitância aumenta consideravelmente com um aumento no número de moléculas de água livres e, com seus dipolos respondendo ao campo elétrico criado pelo capacitor (Dean et al., 1987; Paltineanu & Starr, 1997). Por isso, serem chamados também, de sondas capacitivas.

Este “capacitor” é conectado a um circuito LC (L = indutor; C = capacitor) formando um oscilador. Será gerado um campo elétrico entre os dois eletrodos estendendo-se para fora do tubo e atingindo a matriz do solo próxima a parede do tubo, polarizando as moléculas de água. Desta forma, as trocas de frequência do oscilador ocorrem livremente dependendo apenas das trocas de capacitância na matriz do solo, ou seja, quanto maior a umidade do solo, maior será K_a e a capacitância e conseqüentemente, menor será frequência (F , em Hertz) do circuito, que pode ser medida pela fórmula universal, $F=[2\pi\sqrt{LC}]^{-1}$ (Paltineanu & Starr, 1997). A matriz do solo próximo ao tubo, o plástico envolvendo o sensor e a parede do tubo de acesso, contribuem para a capacitância total.

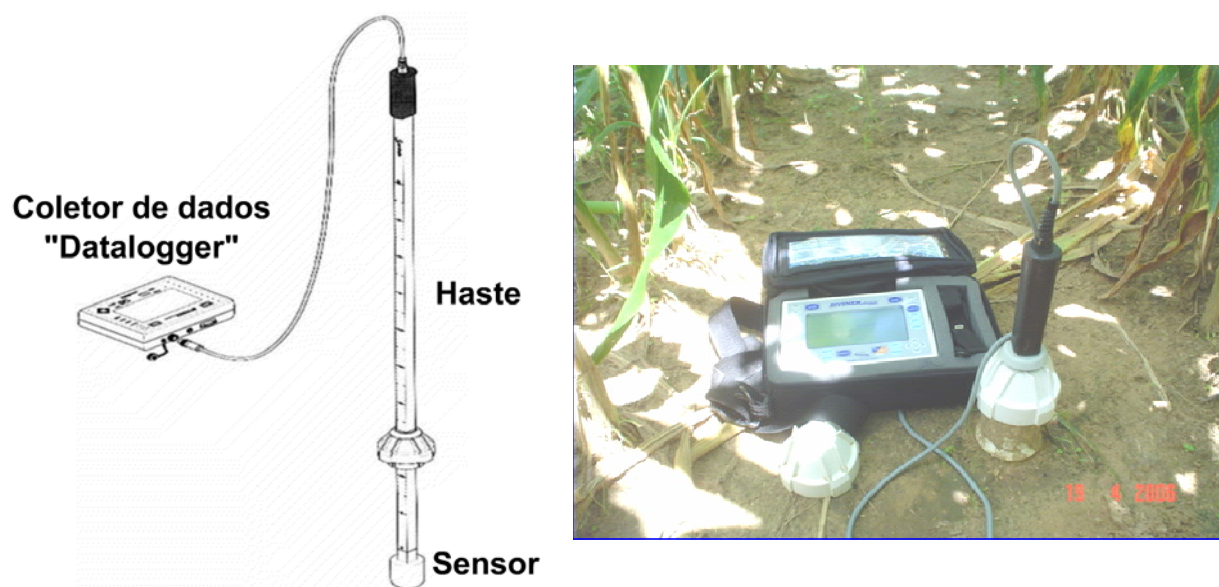


Figura 2. Sonda Diviner 2000 com seus componentes.

A sonda apresenta um display com teclado e coletor de dados “datalogger” acoplado via cabo a uma haste que na sua extremidade apresenta o sensor (envolvido em plástico), que ao ser inserido no tubo de acesso no solo, provê automaticamente leituras do teor da umidade a cada 10 cm de profundidade à medida que a sonda é inserida no tubo (Figura 2). Comercialmente o equipamento apresenta três comprimentos para hastes: 0,7, 1,0 e 1,6m.

A frequência de oscilação (MHz) é transformada digitalmente, pelo equipamento, em uma contagem que pode variar próximo a 120.000 (água) e 160.000 (ar), dependendo das condições de umidade do solo. Note que, diferentemente do TDR que fornece o valor de K_a , a leitura desta contagem não tem nenhum significado físico.

Uma vez que não há exatidão nos valores da contagem da frequência realizadas por sondas diferentes, dada uma condição particular, como por exemplo, água e ar, o fabricante sugere fazer uma normalização das medidas. Para tanto, primeiramente devem-se registrar as leituras dentro de um tubo de PVC exposto separadamente do ar e água. A saída dos dados fornecida pelo datalogger é então denominada de frequência relativa (FR), definida pela seguinte equação:

$$FR = \frac{(F_a - F_s)}{(F_a - F_w)} \quad (1)$$

em que,

F_a é a contagem da frequência da sonda no tubo de PVC, totalmente suspenso no ar;

F_s é a contagem da frequência da sonda no tubo de PVC no solo;

F_w é a contagem da frequência da sonda no tubo de PVC imerso em água.

Nesta etapa, deve-se tomar cuidado para se obter valores consistentes de F_a e F_w , pois do contrário, constitui-se na primeira fonte de erro do equipamento. Os valores sugeridos de F_a e F_w pelo fabricante devem ser próximos de 160.000 e 120.000, respectivamente.

Estes valores de FR são convertidos pelo datalogger em altura de água (mm) para cada camada de solo (10 cm) utilizando a calibração sugerida pelo fabricante ou outra adicionada pelo usuário. As leituras e armazenamento de FR são feitas automaticamente a cada 10 cm de profundidade, basta descer a sonda no tubo de acesso.

A grande vantagem deste modelo é a sua portabilidade, ou seja, com apenas uma sonda, um operador pode monitorar diversos perfis de solo (até 99 perfis). Além disso, as leituras são rápidas e o equipamento é leve.

Já o modelo enviroSCAN (Figura 3) permite o acoplamento de vários sensores em uma haste, no espaçamento desejado. Um total de 32 sensores podem ser acoplados ao datalogger possibilitando o monitoramento do teor de umidade de forma instantânea. O tempo de varredura pode ser programável (1 a 999 minutos). Uma grande vantagem é que a sonda pode estar distante 125m do datalogger que a perda de sinal no cabeamento não é significativa (Starr & Paltineanu, 1998). Segundo o Fabricante o comprimento pode ser de até 500m.



Figura 3. Multisonda enviroSCAN e sistema automático de colata de dados. Foto: (<http://www.sentek.com.au>)

Para testar a variação provocada por leituras no mesmo perfil com sondas diferentes (ainda que o equipamento fornece leituras normatizadas, a frequência relativa), Starr & Rowland (2007) compararam os valores de frequência relativa obtidos com a sonda Diviner 2000 e enviroSCAN, para três tipos de solo e verificaram que ambas as leituras tiveram alto coeficiente de determinação ($R^2 > 0,98$) apesar de que a sonda Diviner 2000 superestimou os valores, em média, com 5% (Figura 4A), a qual foi corrigida e resultou em valores idênticos de teor de água no solo medido por ambas as sondas (Figura 4B).

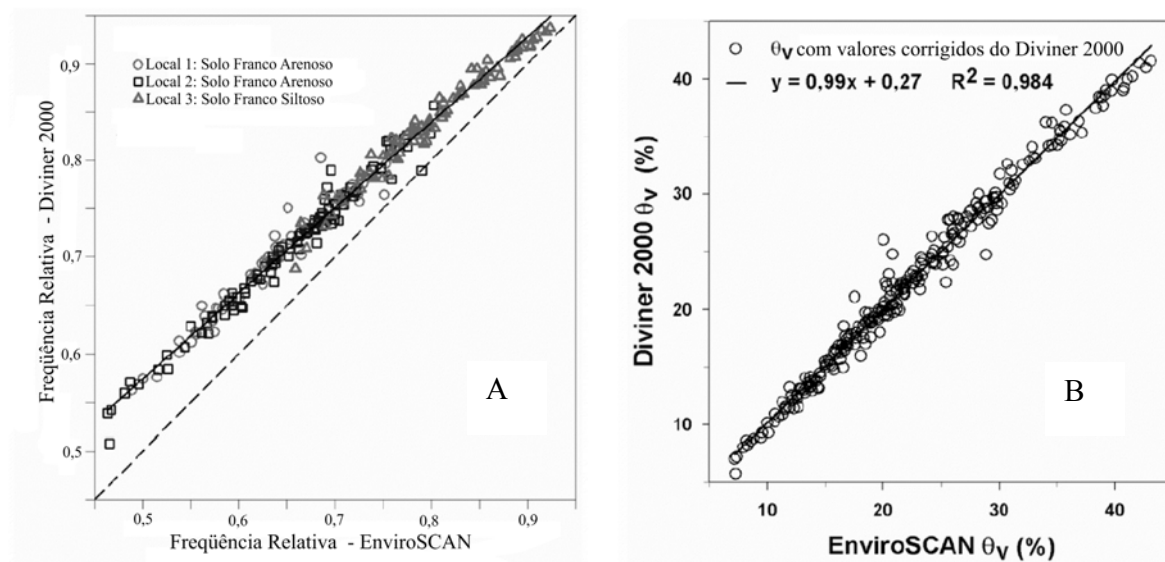


Figura 4. Comparação entre os valores de frequência relativa obtidas com a sonda Diviner 2000 e enviroSCAN (A) e estimativa do teor de água no solo para ambas as sondas, após correção das leituras de frequência relativa da sonda Diviner 2000. **Fonte:** Starr & Rowland (2007).

2.3 Instalação dos tubos de acesso

As sondas Diviner 2000 e enviroSCAN não fazem a leitura diretamente no solo e sim, por meio de um tubo de acesso, sendo feitos de policloreto de vinila ou PVC porém, este tubo permite a propagação do campo magnético para fora (≈ 10 cm radialmente). O diâmetro do tubo permite o livre deslocamento do sensor no tubo de acesso, porém com mínimo espaço entre o sensor e a parede do tubo. Ainda, no Brasil, não foram testadas tubulações de PVC comerciais que poderiam ser usadas para a sonda, portanto, deve-se importar os tubos juntamente com a sonda.

Na instalação da sonda, é extremamente importante evitar qualquer “bolha de ar” entre o tubo e solo, em virtude do pequeno volume de solo considerado entre os dois anéis (eletrodos) do capacitor e pelo fato da constante dielétrica do ar ser praticamente igual a 1. Desta maneira, um espaço de ar entre eles seria quantificado pela sonda como sendo volume de solo sem umidade. Outro fator importante é procurar evitar interferir na estrutura do solo próximo ao tubo.

Na instalação dos tubos, faz-se necessário a utilização de um equipamento específico (também comercializado pelo importador da sonda no Brasil) que consiste basicamente em um trado de ferro, tipo Holandês, martelo de borracha, espátula, tripé para favorecer a inserção do tubo no solo de forma nivelada, base para proteger o tubo das batidas com o martelo de borracha e demais ferramentas para limpeza do tubo após a instalação.

De maneira breve, os tubos devem ser enterrados em prumo em intervalos de 0,15 m usando um martelo de borracha e após cada incremento na profundidade, utilizando-se o trado Holandês (47 mm) para escavar e retirar o solo do interior do tubo (Figura 5). Ao final da instalação, os tubos devem ser limpos internamente com auxílio de uma esponja acoplada ao trado. Um cap deve ser firmemente colocado na extremidade superior do tubo, bem como deve ser realizada a vedação da extremidade inferior do tubo com a colocação de um anel de borracha (ambos adquiridos com o fabricante). Uma boa instalação deve manter o tubo firme ao solo.

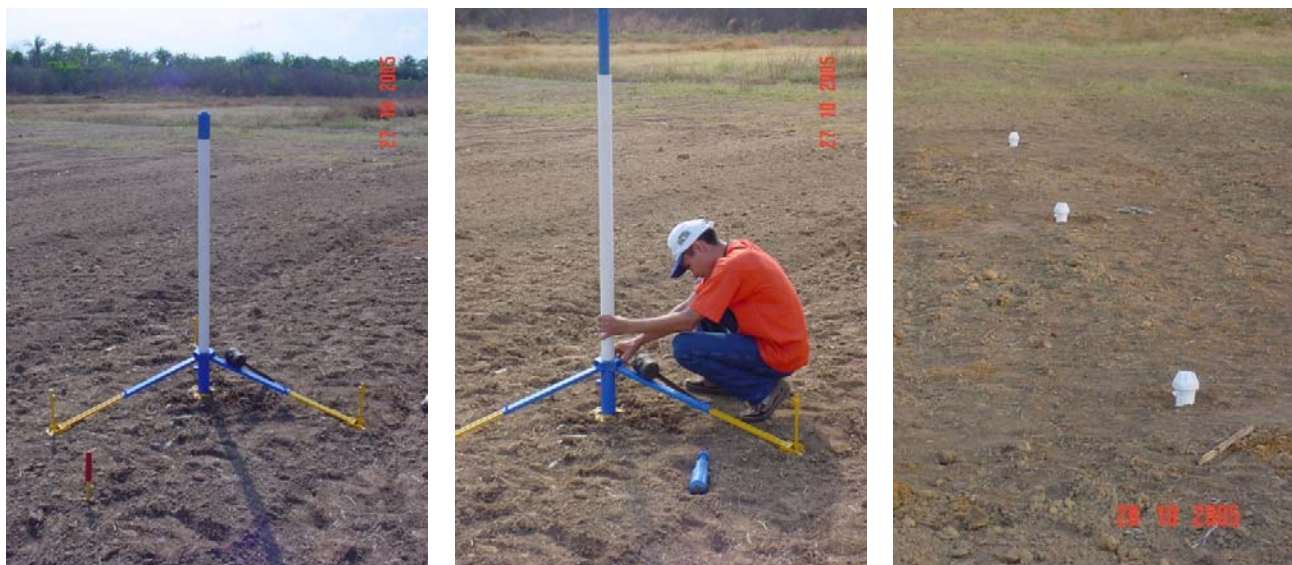


Figura 5. Ferramentas necessárias para a instalação do tubo (A), instalando o tubo (B) e aspecto do tubo após instalação (C).

2.4 Calibração da sonda por capacitância

A relação entre o teor de água no solo e os valores de FR (conhecida como curva de calibração) vem embutida no datalogger. Esta calibração foi feita pelo fabricante com base em determinações feitas experimentalmente para alguns tipos de solo, principalmente arenosos.

Entretanto, existe uma grande variabilidade nos valores de Ka para com base na tipo de mineral de argila do solo (1 a 4), matéria orgânica (1 a 4) tornando-se necessário calibrar os sensores para uma situação particular (Baumhardt et al., 2000) e, se possível, para cada camada de solo (Fares et al., 2004; Silva et al., 2007).

Além disso, dados experimentais têm mostrado que os sensores capacitivos são muito influenciados pela densidade do solo. A compactação do solo geralmente aumenta a densidade do solo, diminui a macroporosidade e a taxa de infiltração da água. Fares et al. (2006) observaram que a umidade volumétrica aumentou com o acréscimo da densidade do solo (Figura 6). A variabilidade na densidade do solo é mais visível em solos desestruturados, principalmente em áreas intensamente cultivadas (Polyakov et al., 2005).

Outro problema enfrentado se refere ao efeito da temperatura nas leituras, uma vez que K da água livre varia inversamente com a temperatura (Weast, 1986 citado por Polyakov et al., 2005), ou seja, um aumento da temperatura da matriz do solo irá diminuir a

capacitância e conseqüentemente aumenta a freqüência de oscilação. Segundo o fabricante, espera-se uma superestimativa de até 5% na faixa de 5 a 35°C. Baumhardt et al. (2000) observaram que tanto para o solo seco quanto para o solo próximo a saturação, a variação no teor de água no solo estimado pela sonda por capacitância acompanhou as flutuações da temperatura do ar diurnamente. Para o solo na saturação as variações máximas foram de (0,02 a 0,04 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Efeito similar foi obtido com a sonda TDR, porém com uma intensidade menor (0,01 a 0,02 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) como ilustra a Figura 7 (A a C).

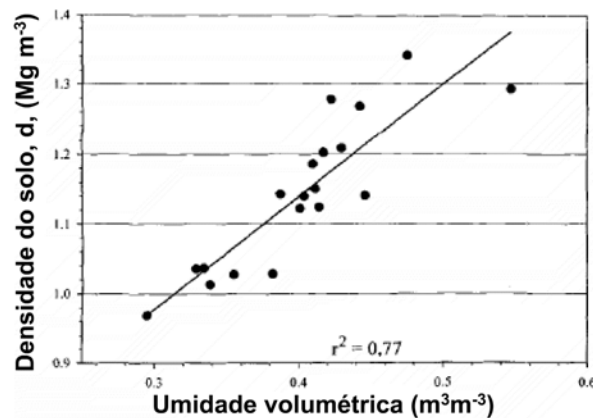


Figura 6. Relação entre a umidade volumétrica do solo e a densidade do solo. **Fonte:** Fares et al. (2006).

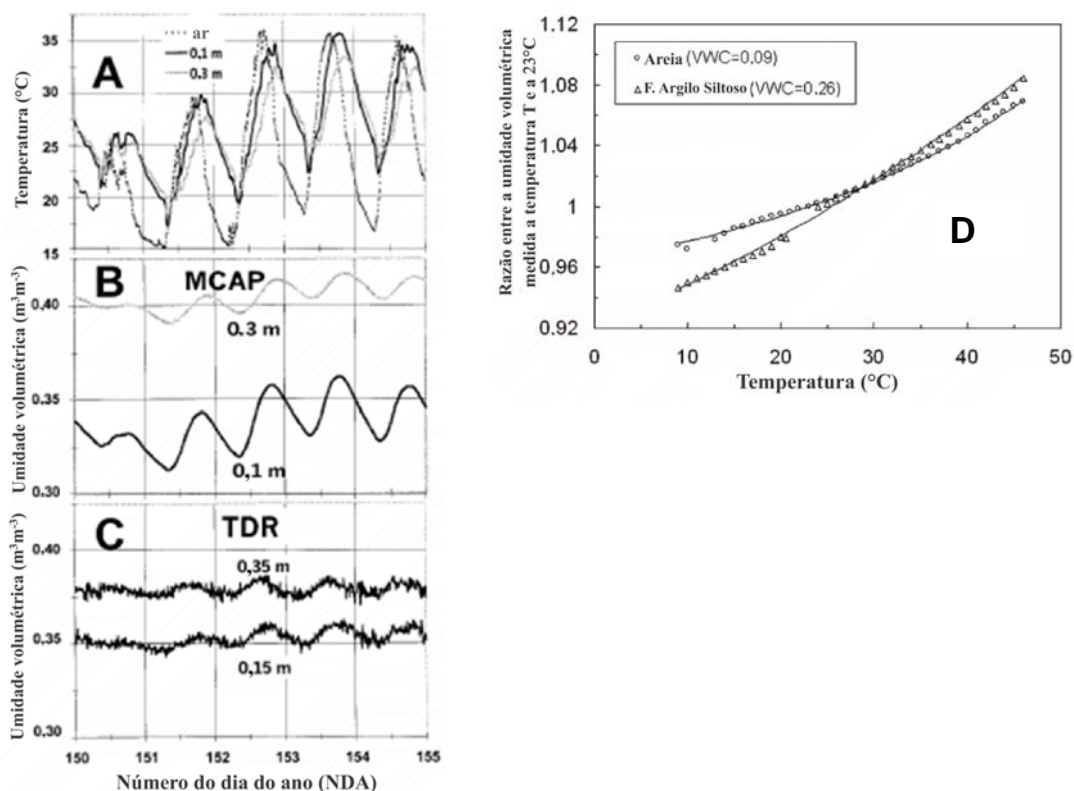


Figura 7. Temperatura do ar e do solo ao longo do dia (A) e teor de água no solo estimado pela multisonda enviroSCAN (MCAP) e pela sonda TDR (C). **Fonte:** Baumhardt et al. (2000). (D) Efeito da temperatura sobre os valores estimados de teor de água, representados pela relação entre o conteúdo medido a temperatura dada e a 23°C, para dois tipos de solo. **Fonte:** Polyakov et al. (2005).

Segundo a demonstração experimental proposta por Wraith & Or (1999), a temperatura afeta as propriedades dielétricas da água retida no solo, principalmente nos minerais do tipo 2:1 (e.g. montmorillonita). Desta forma, alterando a permissividade do meio, uma vez que a constante K da água nesta situação vale $1/20$ do valor de K para a água livre (Wang & Schmugge, 1980). Tal situação também foi corroborada por Polyakov et al. (2005) que compararam o efeito da temperatura do solo e da areia nas leituras de FR pela sonda por capacitância (Figura 7D) e, verificaram que, a curva de regressão para o solo teve uma declividade mais acentuada, resultando em uma taxa de acréscimo de $0,0003$ a $0,001 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para a areia e solo, respectivamente.

Para a correção do efeito da temperatura nas leituras, Polyakov et al. (2005) sugerem que esta deve ser feita juntamente com a calibração do equipamento nas condições de solo locais.

O valor de K da água também pode ser alterado, principalmente, se a solução do solo for salina. Este efeito é por causa de que a frequência de oscilação (principalmente, menores que 30 MHz) polarizam os íons presentes na solução do solo e, assim, aumentam a constante dielétrica aparente, K_a . Para amenizar o problema, as sondas foram projetadas de modo a oscilar próximo a 100 MHz (dentro do tubo de acesso) para reduzir o efeito da acidez e salinidade do solo (Gardner et al., 1991). O fabricante recomenda a utilização das sondas (Diviner 2000 e enviroSCAN) em solo com condutividade elétrica de no máximo ($6,0 \text{ dS m}^{-1}$).

Baumhardt et al. (2000) avaliando o efeito de água salina ($11,3 \text{ dSm}^{-1}$) na precisão da estimativa do teor de água no solo por um sonda de capacitância (EnviroSCAN) verificaram que a sonda superestimou em quase 50% as estimativas do teor de água no solo quando na saturação (Figura 8).

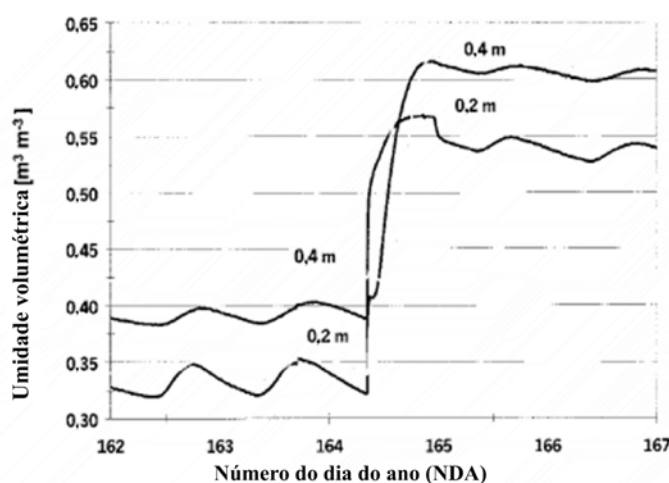


Figura 8. Teor de água no solo estimado pela sonda por capacitância antes e após a resaturação com água salina $911,3 \text{ dSm}^{-1}$. **Fonte:** Baumhardt et al. (2000).

Diante do exposto, fica claro que os sensores de capacitância necessitam ser calibrados para o solo específico e de preferência, em campo, para fornecer leituras precisas da umidade do solo. Diversos os resultados na literatura (Paltineanu & Starr, 1997; Baumhardt et al., 2000; Morgan et al., 1999; Fares et al., 2004; Groves & Rose, 2004;

Polyakov et al. (2005); Andrade Júnior et al., 2007 e Silva et al., 2007), recomendam que calibrações individuais melhoram a precisão e exatidão do equipamento.

Adaptando as recomendações efetuadas por Gardner et al. (1991) e pelo fabricante Sentek (2007), sugere-se o seguinte roteiro para calibração do equipamento: a) Instalar seis tubos de acesso na área, em duas linhas, usando uma disposição de 5 por 2 metros. Após 15 dias (tempo mínimo para acomodação do solo), abrem-se três trincheiras (4 m x 1,5 m x 1,5 m de profundidade), distante 0,4 m de cada tubo (Figura 9A); b) três níveis de umidade são utilizados para cobrir toda a amplitude nos valores do teor de água no solo, denominados de saturado, úmido e seco. Inicia-se o procedimento de calibração no período seco do solo, pois é mais fácil e rápido adicionar água ao solo. Dois tubos serão utilizados para cada nível de umidade. Para o nível de saturação, pode-se aplicar água com ajuda de um anel de infiltração (0,5 m de diâmetro) (Figura 9B) até que, visualmente, a frente de molhamento atinja toda a extensão do tubo. No dia seguinte a aplicação de água, faz-se as leituras com a sonda e a coleta das amostras de solo. Para o nível úmido, aplica-se a mesma quantidade de água, porém leituras e amostragens são realizadas após um período de secamento do solo (4 a 6 dias).



Figura 9. Trincheira aberta próxima aos tubos de acesso (A). Anel de infiltração utilizado para umedecer o solo próximo ao tubo e em profundidade (B). Posição do amostrador tipo Uhland para retirada das amostras indeformadas (C) e (D).

Neste processo, sugere-se realizar três leituras de FR para cada camada de solo (0,1 m – 1,0 m), gerando-se um valor médio de FR para cada camada de solo. Imediatamente após a realização das leituras procede-se a coleta do solo para as determinações da umidade gravimétrica e densidade. Para isto, a cada 0,1 m de profundidade, uma amostra de solo deformada deve ser retirada bem adjacente ao tubo (no máximo 10 cm, devido à distância máxima atingida pelo campo elétrico gerado pelo oscilador) e colocada em uma lata de alumínio com tampa. Concomitantemente, para determinar a densidade do solo, sugere-se retirar três amostras indeformadas por camada, retiradas com um amostrador tipo Uhland (Figura 9C e D). As amostras são pesadas e secas em estufa (105°C) e pesadas novamente após 48 h. A umidade volumétrica (θ_v , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em cada camada de solo será determinada multiplicando a umidade gravimétrica pela média do resultado do quociente entre a densidade do solo e a densidade da água.

Os valores de θ_v e as correspondentes leituras de FR são relacionados de maneira não-linear, com dois ou três parâmetros, conforme os dados obtidos em diversas calibrações em campo (Andrade Júnior et al., 2007; Silva et al., 2007; Polyakov et al., 2005; Fares et al., 2004; Hidalgo et al., 2003; Morgan et al., 1999) e em laboratório (Polyakov et al., 2005; Groves & Rose, 2004; Baumhardt et al., 2000 e Paltineanu & Starr, 1997) como segue abaixo:

$$\theta_v = aFR^b \text{ ou } \theta_v = aFR^b + c \quad (2)$$

em que,

θ_v = Umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

FR = Frequência relativa determinado pela sonda (adimensional);

a, b e c são coeficientes gerados pela regressão.

Um resumo de algumas calibrações relatadas na literatura está presente na Tabela 1. Note que mesmo para um solo com granulometria próxima, os coeficientes e conseqüentemente as curvas podem variar, subestimando ou superestimando o teor de água no solo. Andrade Júnior et al. (2007) testaram a calibração fornecida pelo fabricante e outras calibrações realizadas em campo (Morgan et al., 1999; Fares et al., 2004), verificaram que as curvas de Fares e Morgan superestimaram a umidade do solo em relação à calibração local em 36,8% e 38,7%, em média, respectivamente. Entretanto, a calibração

sugerida pelo fabricante foi muito próxima daquela obtida para este solo, não diferindo significativamente pelo teste F ($p>0,05$) (Figura 10).

Tabela 1. Calibrações obtidas em condições de campo e laboratório relatadas na literatura.

FONTE	Granulometria (g kg ⁻¹)			(Mg m ⁻³)	Equação	R ²
	Areia	Silte	Argila			
Fabricante	-	-	-	-	$\theta_v=0,494FR^{3,017}$	0,99
Groves & Rose (2004)	280	280	440	1,09	$\theta_v=0,514FR^{3,371}$	0,93
Fares et al. (2004)	394	122	484	1,52	$\theta_v=0,440FR^{1,549}-0,040$	0,88
Hidalgo et al.(2003)	70	410	520	1,28	$\theta_v=0,382FR^{1,616}$	0,81
Morgan et al. (1999)	950	-	-	-	$\theta_v=0,451FR^{2,121}$	0,83
Groves & Rose (2004)	650	230	120	1,44	$\theta_v=0,440FR^{2,756}$	
Andrade Júnior (2007)	846	58	95	1,45	$\theta_v=0,397FR^{2,533}$	0,97
Silva et al (2007)	669	100	231	1,59	$\theta_v=0,492FR^{2,757}$	0,93
Groves & Rose (2004)	180	510	310	1,39	$\theta_v=0,530FR^{3,815}$	
Paltineanu & Starr (1997)	350	560	90	1,41	$\theta_v=0,490FR^{2,167}$	0,99

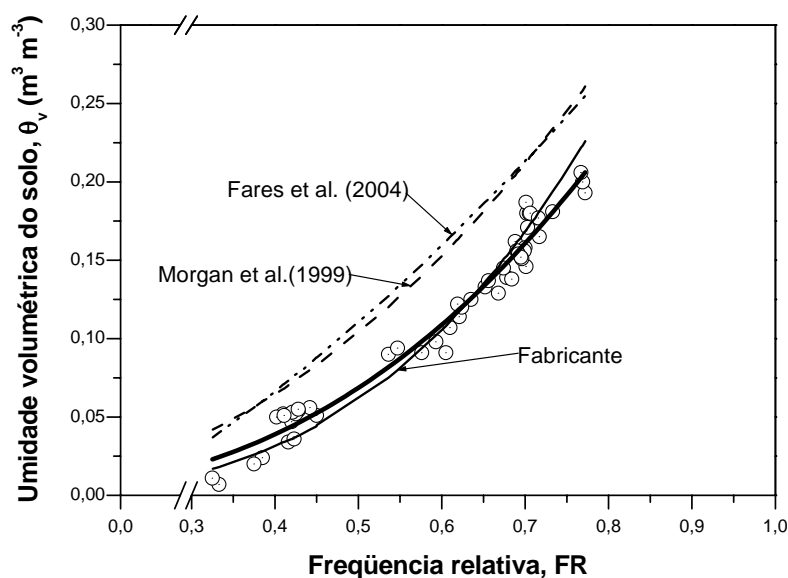


Figura 10. Curvas de calibração da sonda Diviner 2000®, destacando a calibração local para um Latossolo Amarelo na microrregião de Parnaíba, PI. **Fonte:** Andrade Júnior et al. (2007)

3. Uso da sonda por capacitância em áreas experimentais e de manejo de irrigação

Diversas são as potencialidades do monitoramento, em tempo real, do teor de água no solo, dentre os quais podemos destacar: estimativa da capacidade de água do solo, determinação do consumo hídrico diário da cultura, identificação da zona efetiva do sistema radicular, identificação da umidade crítica para as atividades metabólicas da planta, como transpiração e fotossíntese.

Comentários sobre algumas possibilidades de uso com este equipamento:

a) Variação diária no teor de água no solo e estimativa da capacidade de armazenamento de água do solo

A Figura 11A, apresenta um exemplo proposto pelo fabricante (Sentek, 2007), a qual ilustra a dinâmica do armazenamento de água no solo após uma irrigação. As variações são provocadas pelo consumo diferenciado da planta ora por causa que no período noturno a uma interrupção no consumo ou mesmo para os períodos diurnos de maior (ou menor) demanda atmosférica. A Figura 11B apresenta um dos resultados obtidos com o monitoramento do teor de água no solo feito por Starr & Paltineanu (1998) que estudaram a dinâmica da água no solo cultivada com milho sob plantio direto (PD) e plantio convencional (PC). Nesta figura, são pronunciadas as diferenças quanto ao armazenamento de água no solo entre dois sistemas de manejo de solo na cultura do milho: sistema de plantio convencional e plantio direto. Ainda, nota-se as variações provocadas pelas irrigações e chuvas corridas no período. Além disso, pode-se estimar a capacidade de armazenamento do solo, sendo de 172 mm para o plantio direto e de 160 mm para o plantio convencional.

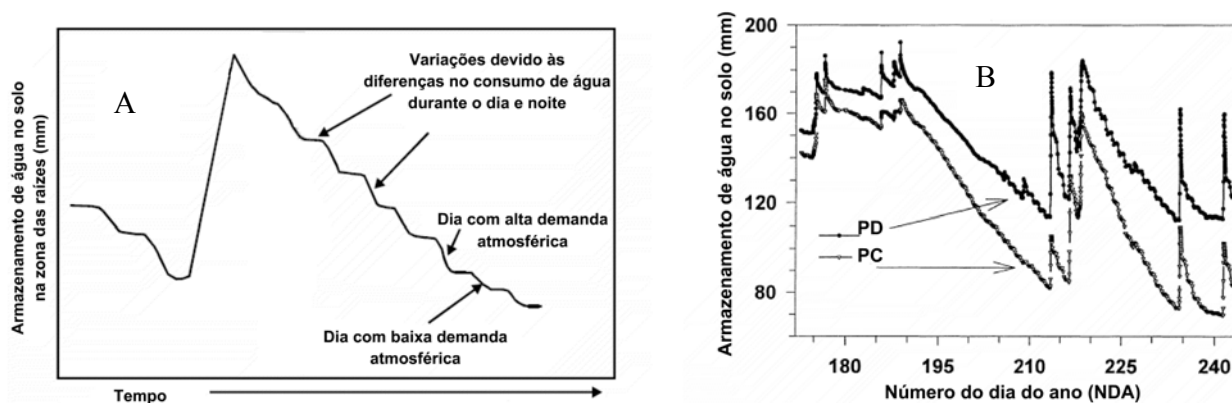


Figura 11. (A) Dinâmica hipotética da água no solo. (B) Dinâmica da água acumulada (5-55 cm) na cultura do milho sob plantio direto (PD) e plantio convencional (PC). Fonte: Starr & Paltineanu (1998).

b) Identificação da zona efetiva do sistema radicular.

O padrão de extração de água no solo fornece informações da zona efetiva do sistema radicular. A totalização da extração de água no solo pode ser feita pela diferença, camada por camada, dos teores de água no solo (mm) no primeiro e do último dia do ciclo de secamento, como feito por Girona et al. (2002) e apresentada na Figura 12A. Nesta figura, fica claro que houve extração somente na faixa de 0 a 100 cm de profundidade, com intensa extração nos primeiros cinquenta centímetros do solo. Ainda, com os dados registrados de hora em hora é possível monitorar a variação diária na extração (Figura 12B). Nesta Figura, observa-se que a máxima extração de água ocorreu por volta das 14h00min, quando o solo estava com sua máxima capacidade de armazenamento (10 e 12 de julho). Com o decorrer do déficit (26 e 28 de julho), o pico de extração foi antecipado para as 10h30min.

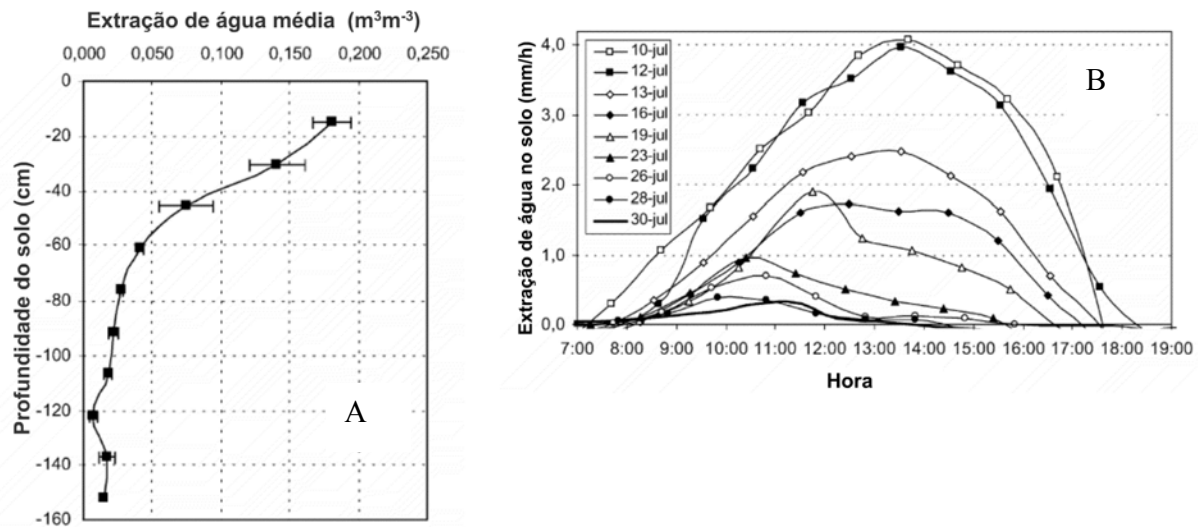


Figura 12. Variação no armazenamento de água no solo em cada camada (A). Quantidade média de extração de água pela cultura do pessegueiro durante um ciclo de secamento do solo (20 dias). Fonte: Girona et al. (2002).

c) Limite crítico de água disponível no solo para atividades metabólicas.

Quando a umidade do solo cai abaixo de um valor não permitindo um rápido transporte de água pelas raízes em resposta a demanda atmosférica, a cultura inicia um processo de estresse hídrico (Allen et al., 1998). Uma das grandes vantagens do monitoramento diária dos teores de água no solo se refere à determinação do início do estresse hídrico pela cultura. Este ponto pode ser identificado, pela significativa perda de extração de água pelas raízes. Por exemplo, no trabalho de Starr & Paltineanu (1998), estes pontos de inflexão estão indicados pela interseção de das declividades no armazenamento de água para cada camada de solo e sob plantio direto (PD) e convencional (PC) (Figura 13A). No PD, este ponto correspondeu, considerando todas as profundidades, aproximadamente, no NDA 197. O mesmo padrão foi observado para PC.

Girona et al. (2002) monitorando o teor de água no solo na cultura do pessegueiro e a taxa de assimilação de CO₂, sob um ciclo de déficit hídrico, verificaram a taxa potencial diminui quando a capacidade de armazenamento da água no solo (CAD) estava em torno de 92% e 58% considerando todo o perfil do solo (0-160 cm) e apenas a zona efetiva do sistema radicular (0-90 cm), respectivamente (Figura 13B).

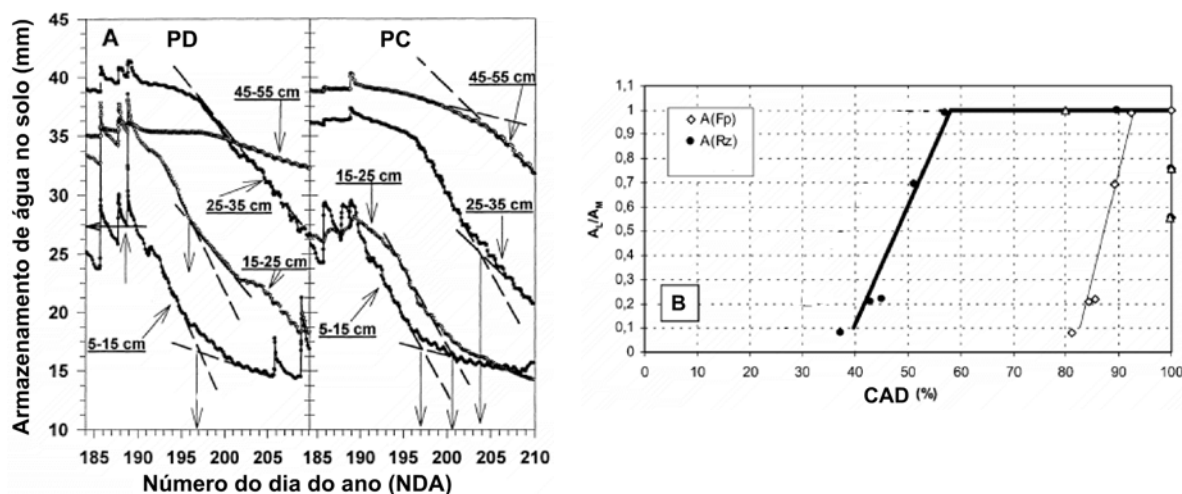


Figura 13. (A) Dinâmica no armazenamento de água no solo em quatro profundidades no solo para o milho cultivado sob plantio direto (PD) e convencional (PC). Fonte: Starr & Paltineanu (1998). (B) Relação entre a assimilação líquida real e potencial de CO_2 (A_L/A_M) com a capacidade de água disponível do solo (CAD) determinada considerando todo o perfil do solo (0-160cm) (AFP) e a zona efetiva do sistema radicular (0-90cm). Fonte: Girona et al. (2002).

4. Utilização da sonda capacitiva Diviner 2000 na unidade da Embrapa Meio-Norte

Em 2005, a Embrapa Meio-Norte (Teresina, Piauí), adquiriu uma sonda Diviner 2000 e, inicialmente foi calibrada em campo em dois solos, sendo um Latossolo Amarelo distrófico, localizado no município de Parnaíba-PI e um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, localizado em Teresina, Piauí. Deste então, a sonda tem sido utilizada regularmente em diversos experimentos, principalmente com o objetivo de determinar a evapotranspiração dos cultivos e para monitoramento da irrigação.

Até o momento, a sonda não apresentou nenhum problema eletrônico. No entanto, no período chuvoso, de manhã, é comum a ocorrência de orvalho no interior dos tubos, que normalmente é retirado com a passagem de um trado com uma ponta com espuma, ou mesmo, após um período de espera para o aquecimento do tubo e consequente evaporação da água condensada.

Apesar de ser fácil e rápido instalar o tubo, é muito difícil retirá-lo, sendo preferível realizar a operação no período chuvoso, porém nem sempre é possível.

Alguns valores inconsistentes de umidade volumétrica têm sido observados mais notadamente nas áreas (ou profundidades) em que a densidade do solo é muito diferente daquela utilizada durante a calibração da sonda.

5. Considerações finais

Pelos resultados apresentados na literatura, as sondas capacitivas têm apresentado boa correlação ($R^2 > 90\%$) com os dados de umidade do solo determinados gravimetricamente.

Com relação à exatidão, a sonda por capacitância, se bem instalada, tem um erro padrão de $0,03$ a $0,01\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ compatível com os erros comumente relatados para a sonda de TDR. Na literatura, ainda são poucos os trabalhos comparativos entre os dois métodos de estimativa.

Dado a sua praticidade apresenta-se, atualmente, com uma boa opção para ser usado em experimentos de pesquisa e, possivelmente, com os recentes avanços técnicos e barateamento de componentes eletrônicos, se torne uma opção no futuro, para os produtores que desejarem manejar a irrigação de forma precisa e confiável.

6. Referências Bibliográficas

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SILVA, C.R. da; DANIEL, R. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do Litoral Piauiense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.2, p. 303-307, 2007.
- BAUMHARDT, R.L.; LASCANO, R.J.; EVETT, S.R. Soil Material, Temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, p.1940-1946, 2000.
- DEAN, T.J.; BELL, J.P.; BATY, A.J.B. Soil moisture measurement by na improved capacitance technique: Part I. Sensor design and performance. **Journal of hydrology**, v.93, p.67-78., 1987.
- FARES, A.; ALVA, A.K. Evaluation of capacitance probes for optimum irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. **Irrigation Science**, v.19, p.57-64, 2000.

- FARES, A.; BUSS, P.; DALTON, M.; EL-KADI, A.I.; PARSONS, L.R. Dual field calibration of capacitance and neutron soil water sensors in a shrinking-swelling clay soil. **Valdoso Zone Journal**, v.4, p.1390-1399, 2004.
- FARES, A.; HAMDHANI, H.; POLYAKOV, V. Real-time soil water monitoring for optimum water management. **Journal of the American Water Resources Association**, v.42, p.1527-1535, n.6, 2006.
- GARDNER, C.M.K.; BELL, J.P.; COOPER, J.D.; DEAN, T.J.; HODNETT, M.G.; GARDNER, N. Soil water content. In: SMITH, R.A.; MULLINGS, C.E. (Ed.) **Soil Analysis: Physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991, cap.1, p. 1-73.
- GIRONA, J.; MATA M.; FERERES E.; GOLDHAMER D.A.; COHEN M. Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water deficits. **Agricultural Water Management**, v.54, n.2, p. 107-122, 2002.
- GROVES S.J.L.; ROSE S.C.L. Calibration equations for Diviner 2000 capacitance measurements of volumetric soil water content of six soils. **Soil Use and Management**, v.20, n.1, p. 96-97, 2004.
- HIDALGO, J.; PASTOR, M.; HIDALGO, J.C. Evaluacion de uma sonda FDR para la estimación del contenido de água em el solo para el control de riegos em Olivar. **Estudios de La Zona No Saturada del Suelo**, v.6, 2003.
- MORGAN, K.T.; PARSONS, L.R.; WHEATON, T.A.; PITTS, D.J.; OBREZA, T.A. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.63, p.987-989, 1999.
- PALTINEANU, I.C.; STARR, J.L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.1576-1585, 1997.
- POLYAKOV, V.; FARES, A.; RYDER, M.H. Calibration of capacitance system form measuring water soil content of tropical soil. **Valdoso Zone Journal**, v.4, p.1004-1010, 2005.
- SENTEK. **Diviner 2000: user guide version 1.4**. Stepney: Sentek Pty Ltd, 2007.
- SILVA, C.R. da; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUSA, A.B. de; Melo, F.B. de; COELHO FILHO, M.A. Calibration of Diviner 2000[®] capacitance probe in a Rhodic Paleudult. **Scientia Agricola**, v. 64, p. 636-640, 2007.

STARR, J. L.; PALTINEANU, I.C. Real-time soil water dynamics over large areas using multisensor capacitance probes and monitoring system. **Soil and Tillage Research**, v.47, p.43-49, 1998.

STARR, J.L.; ROWLAND, R. Soil water measurement comparisons between semi-permanent and portable capacitance probes. **Soil Science Society of America**, v.71, n.1, 2007.

WANG, J.R.; SCHMUGGE, T.J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. **Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.18 p.288–295, 1980.

WRAITH, J.M.; OR, D. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: Experimental evidence hypothesis development. **Water Resource Research**, v.35, p.361-369, 1999.