



## II WORKSHOP DE APLICAÇÕES DE TÉCNICAS ELETROMAGNÉTICAS PARA O MONITORAMENTO AMBIENTAL



### EXPERIÊNCIA DO GRUPO DE ESTUDOS EM ENGENHARIA AMBIENTAL NA CONFECÇÃO E UTILIZAÇÃO DE SONDAS DE TDR.

Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza, Depto. Engenharia Civil - UNITAU

*Bruno de Lima Santoro; Leonardo do Nascimento Lopes; Antonio Claudio Testa*

*Varallo & Claudinei Fonseca Souza*

### Apresentação

O objetivo desta palestra será apresentar a experiência do Grupo de Estudos em Engenharia Ambiental (GEEA), formado por Professores, alunos de Pós-Graduação e Graduação da Universidade de Taubaté, na utilização da técnica da TDR com experimentos em laboratório e em campo, para a determinação da umidade e condutividade elétrica do solo, bem como o manejo da água. Será descrita de forma resumida a participação do Laboratório de Mecânica dos Solos desde a introdução da técnica, dimensionamentos, confecção, aprimoramento, e a calibração das sondas de TDR. Com esta ultima palestra esperamos finalizar o Workshop de maneira a envolvermos os participantes de uma forma mais interativa, promovendo o intercâmbio e a troca de experiências necessárias pertinentes a este tipo de evento.

## SONDAS DE TDR PARA A ESTIMATIVA DA UMIDADE E DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

### INTRODUÇÃO

A água é extremamente importante na produção vegetal, onde o seu manejo racional é decisivo para o desenvolvimento das plantas, evitando sua falta ou excesso. Desta maneira, o conhecimento da dinâmica da distribuição água no solo torna-se cada vez mais necessário, uma vez que, está intimamente ligado às propriedades do sistema solo-água-plantas. O domínio desse conhecimento é, certamente, indispensável ao sucesso de uma agricultura sustentável.

Para estimativas precisas de umidade e condutividade elétrica do solo em laboratório e em campo, tem sido utilizada a técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), a qual recomenda o ajuste de uma curva de calibração para cada tipo de solo, um inconveniente que normalmente é aceitável devido às vantagens que apresenta em relação a outras técnicas (Souza & Matura, 2002).

As vantagens inerentes da técnica da TDR como a precisão, método não destrutivo, a não utilização de radiação ionizante, possibilidade de automação e acoplamento de dispositivos multiplicadores de leituras são justificativas importantes para a adoção cada vez maior desta técnica, em substituição a outros métodos (Coelho & Or, 1996).

A técnica baseia-se na propagação de ondas eletromagnéticas através de hastes condutoras envoltas pelo solo. Este fenômeno se deve a diferença entre as constantes dielétricas (K), da água, do ar e do solo. Na matriz do solo estas constantes variam entre 1 e 81. O ar possui o valor mínimo igual a 1, as partículas sólidas variam entre 3 e 5, e a água, o valor máximo é de 81 (Noborio, 2001). A constante K medida no sistema ar-solo-água é denominada de constante dielétrica aparente (Ka), assim, conhecendo-a pode-se determinar a umidade volumétrica do solo por meio de curvas de calibração obtidas a partir de dados de campo ou de laboratório (Souza & Matura, 2003).

A propagação de ondas eletromagnéticas é convertida para Ka, por meio da equação abaixo (Hook & Livingston, 1995):

$$Ka = \left( \frac{\Delta X}{V_p \cdot L} \right)^2 \quad (1)$$

donde,

$\Delta X$  - Distância percorrida pela onda eletromagnética, m

$V_p$  - Velocidade de propagação, 0,99 (99 % de c)

c - Velocidade da luz,  $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

L - Comprimento da haste, m

A energia da onda é atenuada em proporção à concentração iônica do meio ao longo das hastes condutoras, a qual serve como base para a medida da condutividade elétrica aparente. Desta forma, ao se conhecer a permissibilidade elétrica de um meio padrão (p. e. água deionizada) pôde-se estimar comparativamente, a condutividade elétrica de um meio desejado (p. e. solução do solo).

Para estimar a condutividade elétrica, a técnica da TDR necessita da impedância característica da sonda em água destilada. Em posse deste valor o analisa-se a impedância causada pelo meio estudado, e por diferença estima a condutividade elétrica através da equação abaixo (Giese & Tiemann, 1975):

$$CE = \frac{Z_0}{120\pi LZ_u} \left( \frac{2V_0}{V_{inf}} - 1 \right) \quad (dS \text{ m}^{-1}) \quad (2)$$

onde:

$L$  = comprimento da sonda, m;

$Z_0$  = Impedância característica da sonda. (Deve ser obtido em água destilada);

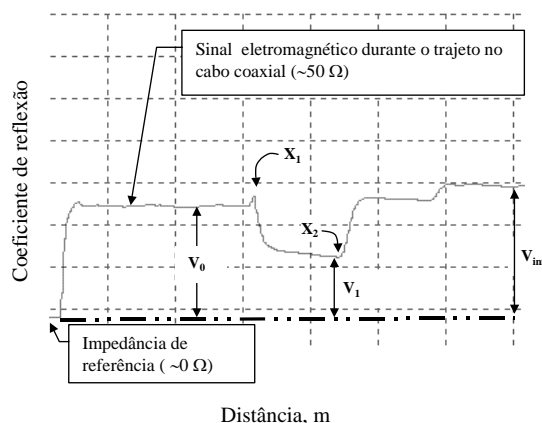
$Z_u$  = Impedância no cabo  $\sim 50 \Omega$ ;

$V_0$  = amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR;

$V_1$  = amplitude do sinal depois da reflexão do início da sonda;

$V_{inf}$  = amplitude do sinal de retorno depois de reflexões múltiplas.

Na Figura 1 pode-se observar um gráfico correlacionando o coeficiente de reflexão em função da distância percorrida para uma sonda contínua com 3 hastes. A sonda utilizada atende a todas as condições mínimas para uma perfeita interpretação do gráfico, o que possibilita a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo.



**Figura 1.** Esquema de interpretação da onda eletromagnética.  $X_1$  é a distância no início da sonda (logo após o final do cabo coaxial) e  $X_2$  é a distância no final da sonda.

A utilização da técnica para a estimativa da condutividade elétrica não é bem difundida entre a maioria dos usuários, devido à carência de informações descrevendo suas potencialidades e limitações, principalmente sobre a qualidade e precisão de leituras *versus* a configuração de sondas. O desafio de conhecer e utilizar-se destas informações de forma correta pode resultar em desenvolvimento de sondas com

vantagens adicionais, pois leituras pontuais de umidade e condutividade elétrica do solo, contribuiriam para que a técnica da TDR fosse ainda mais atrativa como ferramenta capaz de auxiliar no manejo da fertirrigação.

O equipamento de TDR utilizado na agricultura é basicamente composto por um testador de cabo, hastes condutoras (sonda de TDR) e, para a leitura de diversas sondas os dados podem ser adquiridos através de um multiplexador. Todavia, a principal desvantagem tem sido o custo, ainda alto para os padrões da agricultura nacional. Para reduzir erros atribuídos a variabilidade espacial no manejo da irrigação ou para acompanhar a frente de molhamento no perfil do solo é necessário uma expressiva quantidade de sondas de TDR, o que tem sido inviabilizado pelo elevado custo de aquisição das mesmas, principalmente por serem acessórios importados.

Baseando-se nesta limitação, objetivou-se neste trabalho desenvolver de três diferentes tipos de sondas de TDR como alternativa às comerciais, avaliando-as através da estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento das sondas levou em conta os critérios observados na literatura: 1) A amplitude das reflexões  $X_1$  e  $X_2$  de pelo menos 90% da máxima amplitude disponível; 2) Um mínimo de sinal eletromagnético captado; 3) Impedância característica inferior a 200  $\Omega$ . Porém alguns autores descrevem bons resultados utilizando sondas com valores superiores ao recomendado (Coelho et al., 2003; Vellame et al., 2003); 4) Uniformidade na distribuição de energia conduzida pela sonda no meio amostrado; 5) Mínimo custo (Souza & Matsura, 2002; Heimovaara, 1993).

Todas estas exigências estão ligadas à geometria das hastes (quantidade, diâmetro de hastes e espaçamento entre hastes) que conduzem o sinal eletromagnético.

As sondas de TDR propostas são: Sonda contínua com 3 hastes, Sonda multi-haste segmentada e Sonda coaxial de volume variável. As sondas de TDR são descritas abaixo:

### Sonda de TDR

Este tipo de sonda é largamente utilizado pelos usuários da técnica, os quais aplicam em seus trabalhos nas mais diferentes formas de penetração no solo: superficial ou em trincheiras. As sondas contínuas foram construídas com 3 hastes paralelas contínua de aço inoxidável (AISI 304;  $\varnothing = 3$  mm;  $L = 200$  mm). As hastes foram cortadas com 220 mm de comprimento, procedendo-se em seguida a soldagem do capacitor de 3,9 pF na extremidade de duas hastes (lateral e central), tendo este, a função de alterar a

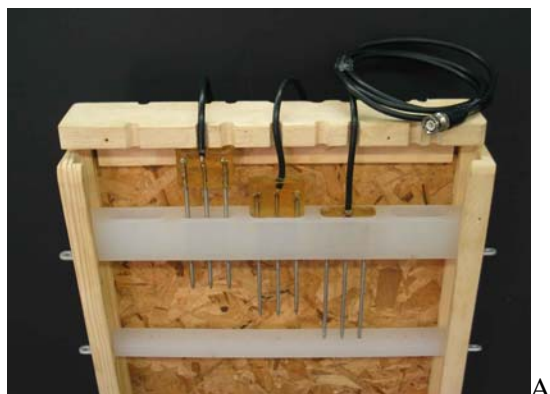
impedância pontual na guia condutora e marcar o início da distância ( $X_1$ , Figura 1) percorrida pela onda eletromagnética. Este procedimento foi necessário para equipamento dedicado do tipo Trase System<sup>1</sup>.

Um cabo coaxial (RG – 58; 50  $\Omega$ ; L = 1,5 m) com um conector BNC em sua extremidade foi soldado nas três hastes, onde o condutor externo do cabo foi ligado nas 2 hastes laterais e interno na haste central. Para a soldagem foram utilizadas uma estação de solda elétrica e uma liga de estanho (Sn 63/37). Para permitir a fixação do capacitor e do cabo coaxial nas hastes de aço inoxidável foi necessária a limpeza da superfície da haste com uma solução de ácido fosfórico a 1%.

O esqueleto da sonda de TDR (hastes, capacitor e cabo coaxial) foi acomodado em um gabarito. Este gabarito foi composto por dois perfis de alumínio com formato em U (Figura 2), servindo de suporte para as hastes, também, existe a possibilidade em usar gabaritos confeccionados em moldes de nylon ou silicone (Figura 3). A resina epóxi foi utilizada com o objetivo de formar um bloco resistente, promovendo sustentação do esqueleto da sonda e marcando o início da sonda (Tektronix 1502 B/C<sup>1</sup> e TDR 100<sup>1</sup>). A retirada das sondas de TDR foi facilitada untando-se o interior do perfil com uma solução desmoldante. Após 8 horas da aplicação do epóxi as sondas adquiriram resistência suficiente e puderam ser retiradas do interior do gabarito. Na Figura 4 são apresentados os detalhes construtivos da sonda.

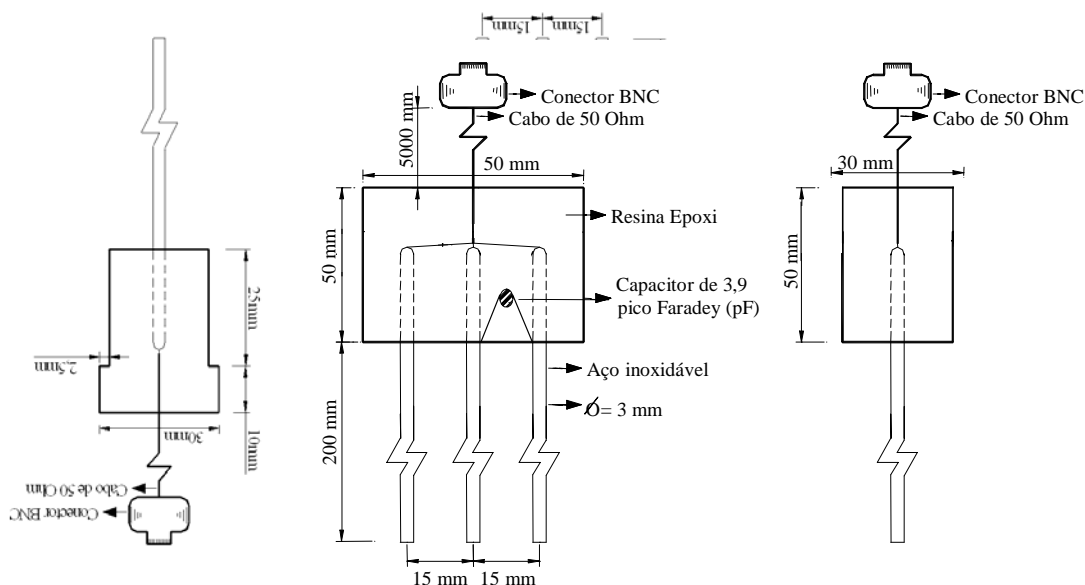


**Figura 2.** Esquema de montagem das sondas



**Figura 3.** Gabaritos para montagem da sonda contínua de 3 hastes. A - Nylon; B - Silicone.

<sup>1</sup> Referências à marca registrada não constituem endosso por parte dos autores.

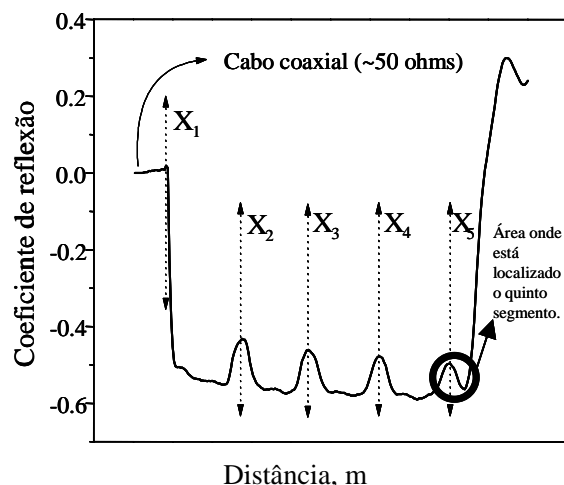


**Figura 4.** Desenho esquemático da sonda de TDR contínua

## Sonda multi-haste segmentada

As sondas multi-haste segmentada desenvolvidas consistem de um sensor com hastes metálicas com trechos de distintos valores de impedância, permitindo a estimativa da umidade em diferentes profundidades no perfil do solo utilizando uma única sonda. Estes trechos são facilmente obtidos pela variação dos diâmetros das hastes que são interpretados utilizando-se o gráfico (Figura 5). As sondas multi-haste segmentada em estudo foram fabricadas em latão, com exceção dos trechos intermediários de diâmetro menor, que são de aço inoxidável. Com o auxílio das barras de deslocamento do equipamento Tektronix 1502 C pode-se obter o deslocamento do sinal eletromagnético na sonda ( $\Delta X = X_{n+1} - X_n$ ).

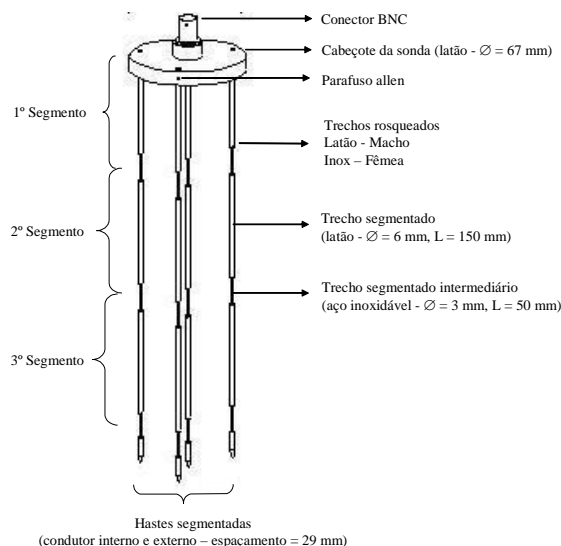
Na Figura 5, observa-se que  $X_1$  é a distância percorrida no início da sonda (logo após o final do cabo coaxial) e  $X_5$  é a distância percorrida no final útil da sonda, e os picos coincidem com o centro do trecho intermediário de diâmetro menor.



**Figura 5.** Esquema de interpretação da onda eletromagnética produzida por uma sonda multi-haste segmentada.

A limitação neste caso é que o quinto e último segmento não apresentam seu término evidenciado, o que prejudica a estimativa da umidade. Por esse motivo, a leitura do último segmento foi desprezada.

A sonda desenvolvida possui, portanto 4 hastes com 675 mm de comprimento, com 3 segmentos de 200 mm e 1 segmento final pontiagudo de 75 mm de comprimento, promovendo um perfil útil de leitura de 600 mm. O detalhamento da construção da sonda e suas dimensões são apresentados na Figura 6. Aproximadamente, 70 % do custo desta sonda foi dispensado para mão-de-obra (serviço de usinagem) para a confecção das peças de montagem.



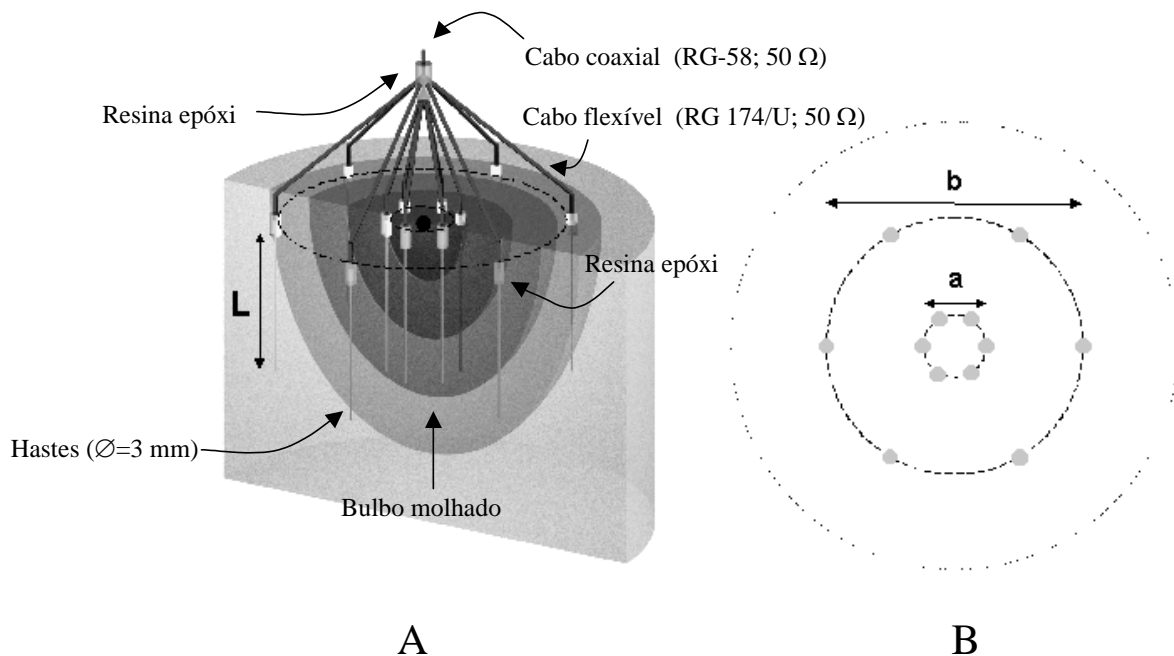
**Figura 6.** Sonda de TDR multi-haste segmentada

### Sonda coaxial de volume variável

A sonda coaxial de volume variável é capaz de estimar o armazenamento da água dentro do volume (integral e/ou parcial) de solo explorado. Desta maneira, a umidade volumétrica contida entre os condutores

interno e externo é determinada através da análise da distância percorrida pela onda eletromagnética emitida pelo testador de cabos. Os condutores, interno e externo, podem ser combinados promovendo diferentes volumes de solo medido. Esta vantagem não é alcançada por outros tipos de sonda por possuírem condutores fixos, as quais necessitam de composições de malhas de sondas para atingir um determinado objetivo, por exemplo, estimar a distribuição de água dentro de um bulbo molhado em irrigação por gotejamento.

A sonda consiste de um cabo coaxial ( $50\ \Omega$ ;  $L = 2\text{ m}$ ) ligado a um cabeçote de resina epóxi, o qual foram conectados 6 cabos flexíveis (RG – 174/U;  $50\ \Omega$ ;  $0,6\text{ m}$ ) ao condutor interno do cabo coaxial e mais 6 cabos ao condutor externo, totalizando 12 cabos. Cada um dos cabos foi ligado a uma haste metálica de aço inoxidável ( $\varnothing = 3\text{ mm}$ ;  $L = 260\text{ mm}$ ), formando uma guia condutora para a onda eletromagnética conforme é apresentada na Figura 7 A e B. O dimensionamento dos cabos flexíveis permite um arranjo concêntrico dos condutores, os quais combinados puderam estimar a umidade em diferentes volumes de solo.



**Figura 7.** A - Esquema da sonda coaxial de volume variável apresentando hastes metálicas inseridas em um bulbo molhado. B - Uma configuração de coaxial, sendo a o condutor interno e b o condutor externo.

As três sondas propostas foram avaliadas fisicamente através do coeficiente de reflexão, da impedância característica e sensibilidade espacial.

O coeficiente de reflexão em função da distância percorrida pela onda eletromagnética apontou informações importantes sobre o desempenho das características utilizadas no dimensionamento da sondas para facilitar a interpretação do sinal eletromagnético gerado pelo TDR, o qual deverá apresentar a amplitude das reflexões  $X_1$  e  $X_2$  e um mínimo de sinal eletromagnético captado.



A impedância característica ( $Z_0$ ,  $\Omega$ ) é o modo de expressar a lei que relaciona a variação de voltagem e corrente com distância ao longo de uma linha de transmissão uniforme, sendo geralmente utilizada para avaliar a performance de sondas de TDR. Em geral, sondas com  $Z_0$  superior a 200  $\Omega$  são limitantes para a determinação da umidade do solo, pois neste caso a impedância característica pode causar um aumento na atenuação do sinal da onda eletromagnética a ser analisado durante a distância percorrida, a qual prejudicará a interpretação do sinal eletromagnético e, também dificulta que a resina epóxi utilizada na confecção do cabeçote seja utilizado como o marcador do início da sonda. Entretanto, alguns autores descrevem bons resultados utilizando sondas com valores superiores ao recomendado. Nestes casos é comum o uso de componentes eletrônicos para facilitar a interpretação do sinal eletromagnético.

Segundo Zegelin et al. (1989) e Heimovaara (1993), pode-se medir  $Z_0$  por determinação do coeficiente de reflexão da sonda ( $p$ ), isso quando a mesma está envolta por um material dielétrico uniforme.

$$Z_0 = Z_u * K^{0.5} * \frac{(1+p)}{(1-p)} \quad (2)$$

sendo,

$$p = \left( \frac{V_1}{V_0} \right) - 1 \quad (4)$$

$K$  = Constante dielétrica. (obtido em água destilada, Souza et. al, 2004).

Para a realização dos testes mencionados utilizou-se um testador de cabos (Tektronix 1502 C, Figura 8) equipado com uma interface RS 232, analisando o sinal eletromagnético automaticamente pelo programa WinTDR 6.0 (Utah State University, Logan-Utah).



**Figura 8.** TDR Tektronix 1502 C

A sensibilidade espacial é um conceito introduzido por Knight (1992), o qual descreve a uniformidade de distribuição de energia emitida pela onda eletromagnética em função da água distribuída entre os condutores interno e externo da sonda de TDR. Assim, quanto maior a uniformidade de distribuição melhor será a representatividade da umidade volumétrica espacialmente medida. Knight (1992) sugere uma relação prática para auxiliar na avaliação de sondas de TDR:

$$\frac{a}{b} \geq 0,1 \quad (5)$$

sendo:

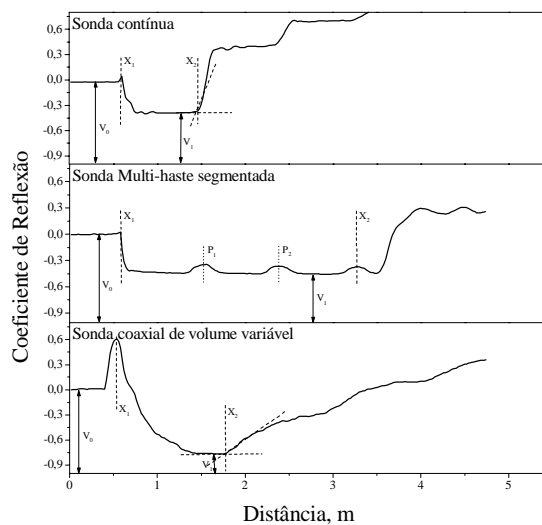
a = diâmetro do condutor interno;

b = diâmetro do condutor externo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Coefficiente de reflexão

A Figura 9 apresenta gráficos que descrevem o coeficiente de reflexão em função da distância percorrida pela onda eletromagnética para os três tipos sondas. Os pontos  $X_1$  e  $X_2$  correspondem à reflexão no início e o final da sonda, respectivamente. Observam-se também as amplitudes do sinal eletromagnético gerado pelo TDR e os picos de impedância provocados pela segmentação da Sonda multi-haste. Portanto, verifica-se que para todas as sondas propostas a constante dielétrica aparente e a impedância podem ser facilmente calculadas para as características dimensionadas, e subseqüentemente possibilita a determinação da umidade e da condutividade elétrica do solo.



**Figura 9.** Interpretação da onda eletromagnética.  $X_1$  é a distância no início da sonda e  $X_2$  é a distância no final da sonda. Sendo  $V_0$  a amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR,  $V_1$  a amplitude do sinal depois da reflexão do início da sonda e  $P_1$  e  $P_2$  são os picos de impedância causados pela segmentação.

### Impedância característica e sensibilidade espacial

Os valores de impedância característica para as diferentes sondas de TDR são apresentados na Tabela 1. Os resultados demonstram um aumento no valor da impedância característica com a diminuição da relação do diâmetro interno e externo ( $a/b$ ) no caso da sonda coaxial. E a sonda de TDR contínua de 3 hastes

apresentou o maior valor medido de impedância característica, atingindo 197  $\Omega$ . De uma maneira geral observou-se que todas as dimensões geométricas utilizadas apresentaram valores de impedância características inferior ao recomendado (200  $\Omega$ ) e, com ótima sensibilidade espacial. Zegelin et al. (1989) apresentaram valores medidos de impedância que não ultrapassaram 173  $\Omega$  para sondas multi-haste contínuas, com 4,76 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, valores estes considerados satisfatórios pelos autores.

Os resultados observados sugerem que as sondas propostas possuem características dimensionais apropriadas para atender as atribuições físicas desejadas em uma sonda de TDR.

**Tabela 1.** Impedância característica e análise de sensibilidade espacial para diferentes configurações de sondas de TDR. Sonda contínua ( $L = 0,20$  m); Sonda multi-haste (3 segmentos;  $L = 0,20$  m); Sonda coaxial de volume variável (20 combinações;  $L = 0,26$  m).

	Diâmetro			Volume (m <sup>3</sup> )	Impedância característica,  Z <sub>o</sub> (Ω)
	(m)				
	Interno, <i>a</i>	Externo, <i>b</i>	<i>a/b</i>		
Sonda contínua					
	0,003	0,027	0,11	0,0001	197
Sonda multi-haste					
1	0,006	0,058	0,11	0,0005	168
2	0,006	0,058	0,11	0,0005	167
3	0,006	0,058	0,11	0,0005	166
Sonda coaxial					
1	0,04	0,07	0,57	0,0007	47
2	0,04	0,10	0,40	0,0017	65
3	0,04	0,15	0,27	0,0043	81
4	0,04	0,20	0,20	0,0078	98
5	0,04	0,30	0,13	0,0180	123
6	0,04	0,40	0,10	0,0323	135
7	0,07	0,10	0,70	0,0010	51
8	0,07	0,15	0,47	0,0036	66
9	0,07	0,20	0,35	0,0072	77
10	0,07	0,30	0,23	0,0174	96
11	0,07	0,40	0,17	0,0317	118
12	0,10	0,15	0,67	0,0025	51
13	0,10	0,20	0,50	0,0061	63

14	0,10	0,30	0,33	0,0163	80
15	0,10	0,40	0,25	0,0306	94
16	0,15	0,20	0,75	0,0036	45
17	0,15	0,30	0,50	0,0138	63
18	0,15	0,40	0,37	0,0281	78
19	0,20	0,30	0,67	0,0102	50
20	0,20	0,40	0,50	0,0245	67

Os resultados apresentados comprovam que todas as sondas possuem características físicas semelhantes na propagação de ondas eletromagnéticas ao longo da sonda; entretanto, Souza & Matsura (2002) observam que, para a sonda multi-haste segmentada existe dificuldade na interpretação dos picos de impedância quando foi utilizado um número elevado de segmentações, a qual aumentou consideravelmente as reflexões do sinal. Os mesmos autores recomendam uma segmentação máxima de 4 trechos.

### **Aplicações potenciais das sondas de TDR propostas**

Devido às características de construção e funcionamento de cada tipo de sonda de TDR proposta, as mesmas podem ser utilizadas de forma mais apropriadas em função de como se quer avaliar a umidade e/ou a condutividade elétrica do solo no espaço e temporalmente. Desta forma o conhecimento das vantagens e desvantagens da aplicação das sondas é a ferramenta primordial no auxílio da tomada de decisão do usuário para o alcance do melhor resultado durante o monitoramento das variáveis.

Desta maneira, acredita-se em várias aplicações potenciais para as sondas propostas, entretanto a motivação original para o estudo foi confeccionar sondas de TDR com baixo custo, sobretudo para viabilizar a aplicação da técnica em situações que necessitem de quantidade elevada de sondas para monitorar a dinâmica da solução do solo. Este monitoramento conduz a aplicações práticas que envolvem integração da umidade e da condutividade elétrica do solo em sistemas que aplicam a água próximo à zona radicular através de gotejamento ou microaspersão. Podendo ainda monitorar o armazenamento de água ou a umidade média dentro de um determinado volume de solo. Esta capacidade poderá ser útil para um pomar em desenvolvimento com árvores jovens (ou vinhas), os quais evoluem com o tempo requerendo diferentes volumes de água e fertilizantes.

As sondas podem ser aplicadas satisfatoriamente para monitorar, quase em tempo real, a distribuição de água no solo ao redor de uma fonte pontual possibilitando o uso de diferentes configurações de malha lateral e vertical no perfil do solo. Especulam-se, também, aplicações nos setores agrícola, industrial e construção civil, onde necessitem de estimativas da umidade em grandes volumes instantaneamente (grãos, processos industriais, barragens e etc). Finalmente, avalia-se que o uso da técnica pode representar um papel importante na experimentação de modelos teóricos sensíveis no espaço e tempo em um alcance ilimitado de

configurações (por exemplo, modelos que predizem a uniformidade de distribuição da água e fertilizantes no solo).

## **CONCLUSÃO**

Os resultados encontrados demonstraram existir viabilidade no uso das sondas de TDR propostas como alternativa às comerciais na estimativa da umidade e da condutividade elétrica no solo uma vez que as sondas desenvolvidas possuem características físicas adequadas, viabilizando a utilização da técnica nas mais diversas condições, principalmente em situações que necessitam de quantidade elevada de sondas de TDR.

## **REFERÊNCIAS**

COELHO, E.F.; OR, D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 6, p. 2007 – 2016, 1996.

COELHO, E.F.; et al. Calibração de dois tipos de sondas de TDR acopladas ao testador de cabos e a multiplexadores em três tipos de solo. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13, 2003, Juazeiro. **Anais**. Viçosa: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 2003. 1 CD ROM

GIESE, K.; TIEMANN, R. Determination of the complex permittivity from thin-sample Time Domain Reflectometry: Improved analysis of the step response waveform. **Advances in Molecular Relaxation Processes**, Amsterdam, v.7, n. 1, p.45-59, 1975.

HEIMOVAARA, T.J. Design of triple-wire Time Domain Reflectometry probes in practice and theory. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 6, p. 1410 – 1417, 1993.

HOOK, W.R.; LIVINGSTON, N.J. Propagation velocity erros in time domain reflectometry measurements of soil water. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 1, p. 92 – 96, 1995.

KNIGHT, J.H. Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content. **Water Resources Research**, Washington, v. 28, n. 9, p. 2345-2352, 1992.

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Baltimor, v. 31, n. 3, p. 213 – 237, 2001.

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

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E. Determination of the wetting front in drip irrigation using TDR Multi-wire probe. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 59, n. 3, p. 205-216, 2003.

SOUZA, C.F.; OR, D.; MATSURA, E.E. A variable-volume TDR probe for measuring water content in large soil volumes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, n. 1, p.25-31, 2004.

VELLAME, L.M.; et al. Guia de onda para estimativa da umidade do solo pela TDR com uso de multiplexadores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32, 2003, Goiânia. **Anais**. Goiânia: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003. 1 CD ROM.

WINTDR. Time Domain Reflectometry soil sample analysis program. Disponível em: <<http://soilphysics.usu.edu/wintdr>>. Acesso em:15 maio 2004.

ZEGELIN, S.J.; WHITE, I.; JENKINS, D.R. Improved fields probes for soil water content and electrical conductivity measurements using TDR. **Water Resources Research**, Washington, v. 25, n. 11, p. 2367 – 2376, 1989.

## SONDAS DE TDR PARA O MANEJO DA SALINIDADE DO SOLO

### 1. INTRODUÇÃO

A irrigação tem como principal finalidade a aplicação de água no solo para garantir umidade adequada para o crescimento das plantas visando aumentar a produtividade e suprir o déficit hídrico durante o período de estiagem. A água usada na irrigação, qualquer que seja a sua fonte, sempre contém sais, embora a quantidade e tipo de sais presentes nela possam variar relativamente. O manejo e controle desses sais no solo requerem uma atenção especial para as técnicas de monitoramento. É óbvio que este monitoramento possui dificuldades de se determinar a atividade de um íon em um ponto determinado solo.

A determinação da condutividade elétrica é uma maneira indireta de inferir a quantidade de sais presentes em uma solução. Quanto maior a condutividade, maior a concentração. À medida que o conteúdo total dos sais aumenta, os problemas no solo e nas plantas se agravam, o que requer o uso de práticas especiais de manejo, objetivando manter a produtividade das culturas em níveis aceitáveis.

Entre as técnicas utilizadas, o uso de extratores é bastante popular entre os pesquisadores por apresentar resultados precisos e a um custo relativamente baixo, mas para medidas “*in situ*” o acondicionamento dos extratores reduz a precisão dos resultados e alteram o local de estudo (importante nos casos de medidas repetidas em uma área pequena) e limitam a obtenção de resultados em curto espaço de tempo.

Dentre as propostas para determinação da umidade e condutividade elétrica dos meios porosos, a técnica da TDR (Reflectometria no domínio do tempo) vem despertando cada vez mais interesse, pois apresentam características desejáveis, como a mensuração em tempo real e a possibilidade de leituras automatizadas, porém apresenta como desvantagens seu alto custo e sua necessidade de calibração, um inconveniente normalmente aceitável comparado com as vantagens que apresenta em relação a outras técnicas.

A mensuração da condutividade elétrica baseia-se impedância de hastes condutoras envoltas pelo solo. Conhecendo os valores de impedância de um meio padrão (água deionizada), pode-se estabelecer a condutividade elétrica de um meio desejado, por exemplo, o solo, através de métodos comparativos (GIESE & TIEMANN, 1975).

A utilização desta técnica para a estimativa da condutividade elétrica não é bem difundida entre a maioria dos usuários, devido à carência de informações descrevendo suas potencialidades e limitações, principalmente sobre a qualidade e precisão de leituras versus a configuração das

sondas. O desafio de conhecer e utilizar-se destas informações de forma correta pode resultar em configurações de sondas com vantagens adicionais. Por exemplo, nas leituras pontuais de condutividade elétrica do solo, tornando a técnica da TDR mais atrativa como ferramenta capaz de auxiliar no manejo e controle da salinidade.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a técnica da TDR com o propósito de verificar possibilidade de substituir o condutivímetro para estimar a concentração de uma solução de  $\text{KNO}_3$

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Construção e Calibração das Sondas**

Para o experimento foram construídas 350 sondas de TDR, do tipo contínua com três hastes paralelas de aço inoxidável com diâmetro de 3 mm e comprimento de 200 mm. Um cabo coaxial provido de um conector BNC em sua extremidade foi soldado nas três hastes, onde o condutor externo do cabo foi ligado às hastes laterais e o interno, à central. Usaram-se ferramentas e procedimentos necessários no processo de soldagem: solda elétrica, liga de estanho, solução de ácido fosfórico a 1%. Após a montagem do esqueleto da sonda (hastes, conector e cabo coaxial), as mesmas foram acopladas a um gabarito confeccionado com silicone e madeira para suportar sua estrutura. A resina epóxi é aplicada ao molde, e após a sua cura à temperatura ambiente se forma um bloco resistente, promovendo assim a sustentação do esqueleto (SOUZA et al., 2006).

Depois do trabalho de confecção, as sondas foram testadas fisicamente, o que consiste em um processo de calibração, onde foram inseridas uma a uma em recipiente contendo água deionizada. A partir da TDR e do aplicativo PC-TDR, instalado em um computador, foram obtidas as constantes de célula das 350 sondas. Esta constante é baseada na impedância da sonda, o qual é imprescindível para a estimativa da condutividade elétrica do solo (GIESE & TIEMANN, 1975). Foi feito um trabalho estatístico (média e desvio padrão) em cima dos valores de constantes de célula, onde sondas fora do limite aceitável, foram excluídas por não apresentarem uniformidade de fabricação, posteriormente, baixa precisão nas estimativas da condutividade elétrica.

### **2.2 Validação das sondas de TDR**

Para a validação das sondas, avaliaram-se as mesmas na estimativa da concentração do nitrato de potássio ( $\text{KNO}_3$ ). Foram preparadas diferentes concentrações de solução de  $\text{KNO}_3$  em um recipiente com 3 L de água e em seguida, conhecendo sua concentração em mmol/L, foram comparadas as estimativas realizadas pelas sondas de TDR e comparadas com as leituras realizadas



através de um condutivímetro. As comparações foram realizadas por uma análise de regressão simples entre os resultados obtidos e estimados e também, foi calculado o erro médio.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Entre as 350 sondas confeccionadas apenas 6 % foram excluídas por apresentarem constantes de célula fora do desvio padrão calculado. Este resultado demonstra confiabilidade na metodologia apresentada por SOUZA et al., 2006 para a confecção de sondas de TDR na substituição de sondas comerciais.

A Figura 1 apresenta a relação entre as diferentes concentrações da solução de  $\text{KNO}_3$  e a estimativa da condutividade elétrica entre as diferentes técnicas em comparação e também, uma correlação entre as técnicas.

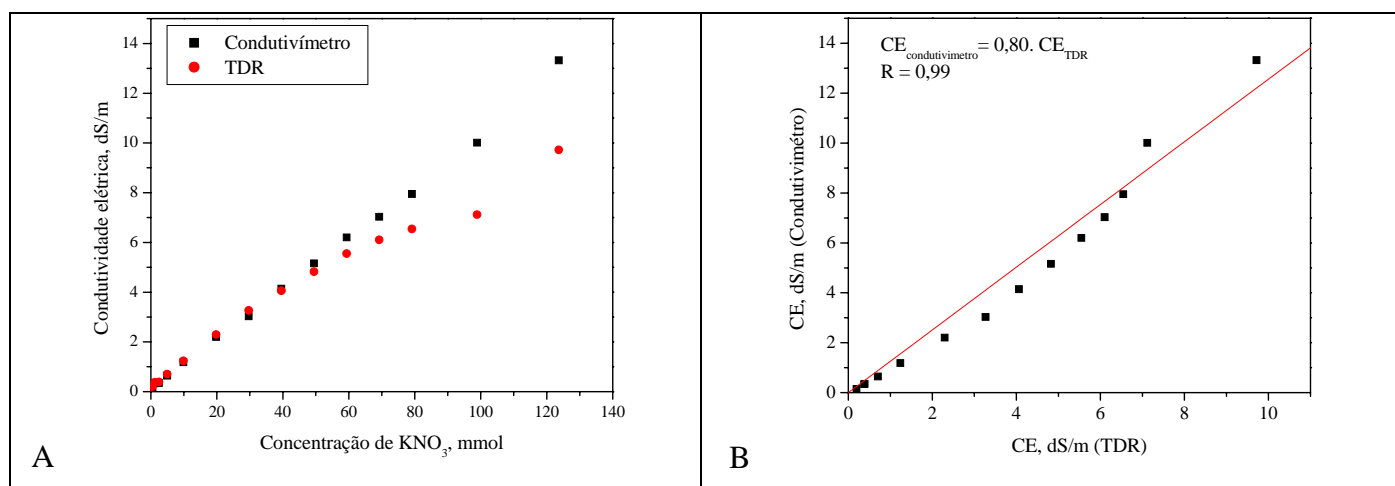


Figura 1. A - Comparação entre as estimativas realizadas entre o condutivímetro e o TDR. B – Correlação entre as técnicas de estimativa da condutividade elétrica.

O erro médio,  $\pm \sqrt{\sum (\text{ajustado}_i - \text{medido}_i)^2 / n}$ , calculado foi  $\pm 1,33$  dS/m. Além disso, verificou-se um coeficiente de correlação satisfatório ( $R = 0,99$ ) entre as leituras de CE obtidas com as técnicas (Condutivímetro versus TDR) (Figura 1B). Estes resultados comprovam existir uma associação linear entre as técnicas e indicam uma variação direta no valor de CE estimado pelo Condutivímetro com uma unidade de CE medido pela TDR, comprovando-se que a solução de  $\text{KNO}_3$  apresenta uma relação funcional na impedância ao longo das hastes metálicas. Desta forma, a técnica da TDR pode substituir a técnicas do condutivímetro para a solução em questão, promovendo agilidade na estimativa da condutividade elétrica do solo sem alterar o meio em

estudo. Entretanto, recomenda-se o levantamento de uma curva de calibração para cada tipo de solo a ser estudado (SOUZA & MATSURA, 2002).

#### 4. CONCLUSÕES

1) As sondas de TDR em estudo explicaram satisfatoriamente a variação da condutividade elétrica da solução de  $\text{KNO}_3$  em condições de laboratório. 2) Os resultados obtidos revelaram que a técnica da TDR pode substituir o condutivímetro.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E. (2002). *Avaliação de sondas multi-haste segmentadas para o monitoramento da umidade do solo por meio da técnica de TDR*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 6, pp. 63-68.

GIESE, K.; TIEMANN, R. (1975). *Determination of the complex permittivity from thin-sample Time Domain Reflectometry: Improved analysis of the step response waveform*. Advances in Molecular Relaxation Processes, 7, pp. 45-59.

## **TÉCNICA ELETROMAGNÉTICA PARA A ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO**

### **INTRODUÇÃO**

A água é extremamente importante na produção vegetal, o seu manejo racional é decisivo para o desenvolvimento das plantas, evitando a falta ou excesso. Desta maneira, o conhecimento da distribuição do teor de água (umidade) no solo torna-se cada vez mais necessário, uma vez que está intimamente ligado às propriedades do sistema solo-água-planta, onde o domínio desse conhecimento é, certamente, um dos fatores indispensáveis para uma agricultura sustentável e sem prejuízos ao meio ambiente.

Diversos são os métodos para a determinação da umidade do solo, como o gravimétrico, considerado o método direto padrão, além dos métodos indiretos, que estimam, a partir de outras propriedades do solo, tais como termalização de nêutrons, resistência elétrica e técnicas eletromagnéticas.

O método gravimétrico apresenta resultados precisos a um custo relativamente baixo, quando usado como técnica laboratorial, mas para medidas no campo o acondicionamento e transporte das amostras podem reduzir a precisão dos resultados e, ainda, para amostragens repetidas em uma pequena área, podem causar interferência no local em estudo. O uso da sonda de nêutrons exige um treinamento especial para seu manuseio, principalmente pela presença de fontes radioativas. O bloco de gesso é um instrumento simples e de baixo custo, mas o elemento sensor sofre deterioração com o tempo devido à interação com os compostos físico-químicos do solo (Selker et al., 1993; Coelho & Or, 1996).

Para medidas de umidade do solo em laboratório e em campo, a utilização de técnicas eletromagnéticas possui algumas vantagens quanto ao uso, principalmente pela precisão, possibilidade de multiplicação de leituras, repetição sem destruição da amostra de solo e pela segurança (Topp et al., 1980; Coelho & Or, 1996). Entretanto, a principal desvantagem tem sido o custo, ainda alto para os padrões da agricultura nacional.

As técnicas eletromagnéticas baseiam-se no efeito da umidade do solo sobre a velocidade de propagação de pulsos de microondas em cabos condutores envoltos por solo. Este fenômeno se deve à diferença entre as constantes dielétricas, ( $K$  [adimensional]), da água, do ar e do material sólido do solo. Na matriz do solo as constantes dielétricas variam entre 1 e 81. O ar possui o valor mínimo igual a 1, as partículas sólidas variam entre 3 e 5, e a água possui o valor máximo 81 (Noborio, 2001). A constante  $K$  medida neste sistema (ar-solo-água) é denominada constante dielétrica aparente ( $K_a$  [adimensional]); assim, conhecendo-se esta variável, pode-se estimar a umidade volumétrica do solo por meio de calibrações obtidas a partir de dados de campo ou de laboratório (Conciani et al., 1996). Para a medição são necessários, basicamente, um testador de cabo e um sensor com hastes metálicas (sonda) ligados por um cabo coaxial.

Existem duas vertentes para a utilização da técnica eletromagnética para a medição da umidade do solo no que diz respeito à frequência de operação do equipamento. A primeira, a frequência de operação

flutua entre valores inferiores a 100 MHz, também chamada de técnica de capacitância; a segunda opera aproximadamente na frequência de 1,2 GHz, as chamadas Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR).

O uso da TDR para estimar a umidade do solo tem sido limitado pelo custo, tanto do testador de cabo como da sonda, na qual existe a necessidade de uma eletrônica mais apurada para a geração do pulso eletromagnético, pois em geral o equipamento opera em uma frequência aproximada de 1,2 GHz.

Esta frequência polariza os bipolos presentes no solo cujo fenômeno é responsável pelo efeito da água (bipolo) sobre a velocidade de propagação da onda eletromagnética. Este fato tem sido contornado com a utilização da técnica de capacitância que, por redução da frequência de operação, permite usar frequências inferiores a 100 MHz, a qual interfere na polarização dos íons. Esta frequência reduzida permite maior poder de aquisição do equipamento devido ao custo eletrônico ser menor quando comparada a TDR. Sabe-se, também, que sua utilização não está difundida entre os usuários da técnica, devido à carência de informações descrevendo suas potencialidades e limitações, principalmente sobre a calibração dos equipamentos para a determinação da umidade do solo. Desta maneira, o objetivo deste trabalho foi avaliar um equipamento de Capacitância (Stevens Hydra Probe<sup>2</sup>) com o propósito de verificar as vantagens e desvantagens na estimativa da umidade do solo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O solo deformado pertencente ao grande grupo Latossolo vermelho amarelo, foi coletado de uma camada superficial (0-0,30 m) no campo experimental do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU. A após seco, foi peneirado em tamis de 2 mm e colocado em dois recipientes plásticos (dimensões de 0,25 m de altura e 0,20 m de diâmetro) em camadas de 0,05 m que foram, a seguir, levemente compactadas de forma a reproduzir sua condição original de campo. A densidade do solo foi de  $1.204 \text{ kg m}^{-3}$ , calculada com base na média de 5 anéis volumétricos retirados em cada camada de solo.

No recipiente, uma sonda de capacitância (Figura 1) foi instalada no eixo vertical central para a estimativa da umidade do solo. Após a saturação do solo via ascensão capilar (24h), as amostras foram secas ao ar durante dois meses, e em períodos de repouso (aproximadamente 2 dias), procedia-se à leitura do equipamento de capacitância. Após cada leitura o recipiente era pesado em balança para a determinação da umidade gravimétrica, expressa em base de volume. Desta forma, a técnica de capacitância foi calibrada e comparada com o método direto padrão (Gravimetria).

---

<sup>2</sup> Referências à marca registrada não constituem endosso por parte dos autores.



FIGURA 1. Sonda de capacitância utilizada (Stevens Hydra Probe).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os resultados médios da umidade volumétrica ( $\theta$ ) e da constante dielétrica ( $K_a$ ), apresentados na Tabela 1, pôde-se analisar e comparar o desempenho do equipamento estudado.

TABELA 1. Resultados obtidos em condições de laboratório

Data (2006)	Constante dielétrica, $K_a$	Umidade volumétrica, $\theta$	
		Capacitância **	Gravimétrica
6/jun	25,46	0,39	0,37
8/jun	25,40	0,38	0,36
9/jun	25,40	0,38	0,35
12/jun	24,51	0,37	0,33
14/jun	22,38	0,34	0,32
19/jun	21,31	0,33	0,29
20/jun	18,29	0,29	0,29
21/jun	17,41	0,27	0,28
22/jun	17,11	0,27	0,27
23/jun	16,97	0,27	0,26
26/jun	16,16	0,26	0,25
29/jun	14,78	0,24	0,23
30/jun	13,44	0,22	0,22
6/jul	12,85	0,21	0,19
14/jul	10,78	0,17	0,16
26/jul	7,77	0,12	0,11
27/jul	4,18	0,04	0,10
3/ago	2,95	0,00	0,08
4/ago	2,88	0,00	0,07

\*\* Calculada através da equação de calibração proposta pelo fabricante.

Mesmo com o fenômeno da constante dielétrica (permissibilidade) sendo influenciada pela umidade e salinidade (ação resultante da polarização dos íons), a precisão da estimativa da umidade do solo não foi afetada pelo aumento da parte imaginária da constante dielétrica, a qual é consequência da polarização dos íons e, conseqüentemente, aumenta os distúrbios causados durante a estimativa da umidade do solo.

O erro médio,  $\pm \sqrt{\sum (\text{ajustado}_i - \text{medido}_i)^2 / n}$ , calculado foi  $\pm 0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Além disso, verificou-se um coeficiente de correlação satisfatório ( $R^2 \approx 0,97$ ) entre as leituras de  $\theta$  obtidas com as técnicas (Capacitância *versus* Gravimétrica) (Figura 2A). Estes resultados comprovam existir uma associação linear entre as técnicas e indicam uma variação direta no valor de  $\theta$  estimado pela Capacitância com uma unidade de  $\theta$  medido pelo método gravimétrico, comprovando-se que a água no solo apresenta uma relação funcional na propagação de ondas eletromagnéticas ao longo das hastes metálicas, independentemente da frequência utilizada. Desta forma, a técnica de capacitância pode substituir a técnicas padrão para o solo em questão, promovendo agilidade na determinação e não alterando o meio em estudo.

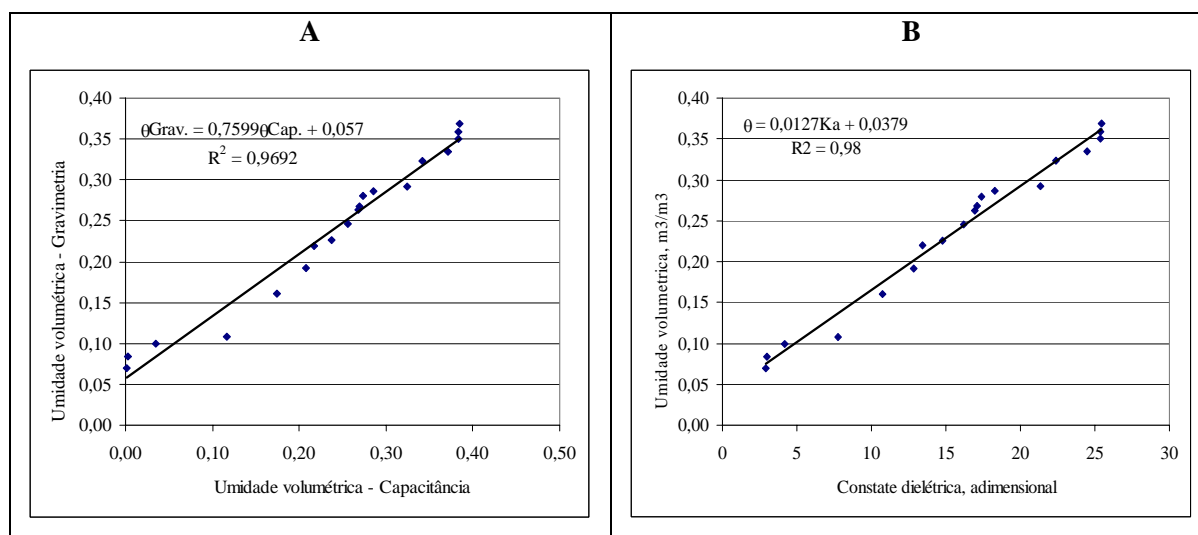


FIGURA 2. A. Correlação entre a técnica de capacitância e gravimétrica, valores em  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ; B. Equação de calibração para os valores de constante dielétrica e umidade do solo medida pelo método gravimétrico.

A equação de calibração encontrada (Figura 2B) demonstrou ser um pouco superior a equação oferecida pelo fabricante, erro médio igual a  $\pm 0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Entretanto, esta nova calibração não inviabiliza a utilização da equação desenvolvida pelo fabricante, porém, sugere-se que uma curva de calibração seja efetuada para solos tropicais devido a distúrbios que este meio pode acarretar na qualidade das umidades estimadas, principalmente em condições de elevado teor de argila e óxidos.

## CONCLUSÕES

1) A equação de calibração obtida e a fornecida pelo fabricante explicaram satisfatoriamente a variação da umidade do solo em condições de laboratório. 2) Os resultados obtidos revelaram que a técnica de capacitância pode substituir a técnica padrão promovendo agilidade na determinação e não alterando o meio em estudo. Entretanto, recomenda-se o levantamento de uma curva de calibração para cada tipo de solo a ser estudado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA:

COELHO, E.F.; OR, D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. **Trans. of the ASAE**, St. Joseph, v.39, p.2007-2016, 1996.

CONCIANI, W.; HERRMANN, P.S.P.; MACHADO, S.L.; SOARES, M.M. O uso da técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR) para determinação da umidade do solo in situ. R. **Solos e Rochas**, São Paulo, v.19, p.189-199, 1996.

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Comp. and Elec. in Agr.**, Amsterdam, v.31, p.213-237, 2001.

SELKER, J.R.; GRAFF, L.; STEENHUIS, T. Noninvasive time domain reflectometry moisture measurement probe. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.57, p.934-936, 1993.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resour. Res.**, Washington, v.16, p.574-582, 1980.

## **DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO SOLO PARA O MANEJO DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO**

### **INTRODUÇÃO**

Uma técnica bastante utilizada para suprir a demanda de água e nutrientes pelas culturas é a prática da irrigação, que possibilita a incorporação de áreas previamente consideradas impróprias para o cultivo, pela ocorrência de déficits hídricos. Além de proporcionar o aumento da produtividade, pode contribuir para melhoria da qualidade e se constituir também em fator estabilizador da produção.

A agricultura irrigada moderna busca mais do que simplesmente o aumento de produção de alimento. É necessário que seja sustentada no meio ambiente primando pelo bom manejo da água. Desta forma, surge o principal desafio: implantar esta tecnologia com base em dados econômicos e sem prejuízos ao meio ambiente. O ponto de partida, porém, é fazer uma análise completa e específica das condições da propriedade rural e em seguida escolher, dimensionar e manejar adequadamente o sistema de irrigação.

Dentre os vários sistemas de irrigação, o gotejamento tem sido crescentemente utilizado, sobretudo pela sua maior eficiência no uso da água. A água é aplicada ao solo em pequenas quantidades, embora com alta frequência, diretamente sobre a região radicular, mantendo a umidade do solo nessa região, próximo à capacidade de campo (Souza & Matsura, 2004). Esta região é conhecida como bulbo molhado, de onde as raízes da planta irrigada absorvem facilmente água e nutrientes.

A irrigação por gotejamento ocupa uma significativa porção das áreas irrigadas no mundo e está em crescimento, mas somente em áreas específicas e para culturas economicamente rentáveis. A razão para esta limitação é econômica, pois o método possui alto custo de equipamentos, instalação e manutenção (Dasberg & Or, 1999).

Comparado com outros métodos de irrigação (Randall & Salvatore, 1988; Assaf et al., 1989; Shrivastava et al., 1994), o gotejamento possui várias vantagens, destacando-se o aumento da produtividade e a conservação da água. Para esta última, Wu & Gitlin (1983) concluem que uma eficiência de aplicação de 90% pode ser facilmente alcançada, cujo cálculo assume que a variação da vazão entre gotejadores não excede 20%, o qual é um critério conservador de acordo com Solomon & Keller (1978), Randall & Salvatore (1988), Dasberg & Or (1999); e Shrivastava et al.



(1994) destacam uma desvantagem não diretamente econômica, que é a falta de conhecimento dos processos que envolvem a distribuição da água no solo.

A estimativa adequada da distribuição e do armazenamento da água dentro do bulbo molhado é de fundamental importância para a determinação do número de emissores por planta e da sua localização em relação à planta ou fileira de plantas. A superestimativa da porcentagem de solo molhado reduz a eficiência do sistema, onerando-o desde o superdimensionamento da estrutura hidráulica ao desperdício de água, energia e fertilizantes, enquanto a subestimativa poderá acarretar riscos de estresse à cultura e promover a má distribuição do sistema radicular (Souza & Matsura, 2004).

Além disso, é primordial a escolha adequada dos componentes e do layout do sistema para promover a distribuição precisa da água para todas as plantas cultivadas, considerando-se e respeitando fatores econômicos, operacionais e ambientais. Concomitantemente, a variação espacial das propriedades físicas do solo adiciona variações na distribuição da água aplicada pelos gotejadores. Estas variações no volume de solo molhado são um problema à estimativa adequada do número de gotejadores por planta e de sua localização em relação às plantas ou fileiras de plantas (Clothier et al., 1985; Or, 1996); além disso, perdas por percolação reduzem a eficiência do sistema de irrigação. Desta forma, o conhecimento da distribuição da água no solo torna-se de fundamental importância para a agricultura, sobretudo na estimativa de sua variação, na otimização do manejo do solo e da água.

A compreensão inadequada desses processos se associa, ao uso incorreto desta técnica, na maioria das vezes devido à utilização de informações empíricas, retiradas da literatura e apresentadas na forma de tabelas e fórmulas (Ould Mohamed El-Hafedh et al., 2001). Para auxiliar a resolução desses problemas, testes em campo são sugeridos para gerar informações capazes de auxiliar na estimativa do dimensionamento do sistema de irrigação por gotejamento. Geralmente, testes de campo não são realizados devido ao tempo necessário, trabalho árduo, recursos e cuidados experimentais envolvidos, principalmente por ser recomendada a abertura de trincheiras (Keller & Bliesner, 1990); desta forma, a prática se adianta à investigação científica e com isso surgem os problemas. Infelizmente, este fato tem implicado em prejuízos de produtividade e desestímulo ao uso da técnica do gotejamento, por parte de alguns agricultores.

Deste modo, o conhecimento do processo de distribuição de água no solo, pode ser extremamente útil no dimensionamento do projeto e no manejo de irrigação por gotejamento, possibilitando a determinação de critérios de projeto, como área molhada pelo gotejador, dimensões do bulbo molhado, eficiência dos sistemas e posicionamento de sensores de umidade e de potencial.

Para isso, estudaram-se três vazões de gotejadores em função da distribuição da água do solo, avaliando-se os efeitos na relação água-solo em função do tempo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O tipo de solo da área onde foi instalado o experimento é o Latossolo vermelho-amarelo, com uma textura média do tipo areno-argiloso com as características apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1. Características físico-hídricas do solo da área experimental.

CC	PMP	p	ds	Dp	VIB	Areia	Silte	Argila
$(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$			$(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$		$(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	$(\%)$		
0,34	0,22	0,56	1,4	2,7	7,2	59	13	28

CC = Capacidade de campo; PMP = Ponto de murcha permanente; p = Porosidade; ds = Densidade do solo; dp = Densidade das partículas; VIB = Velocidade de infiltração básica.

O monitoramento da dinâmica da água no solo foi realizado através de 48 sondas de TDR em pequenos intervalos de tempo, logo após a infiltração. A disposição das sondas no solo seguiu a metodologia proposta por Coelho & Arruda (2001) como pode ser observado no esquema da Figura 1.

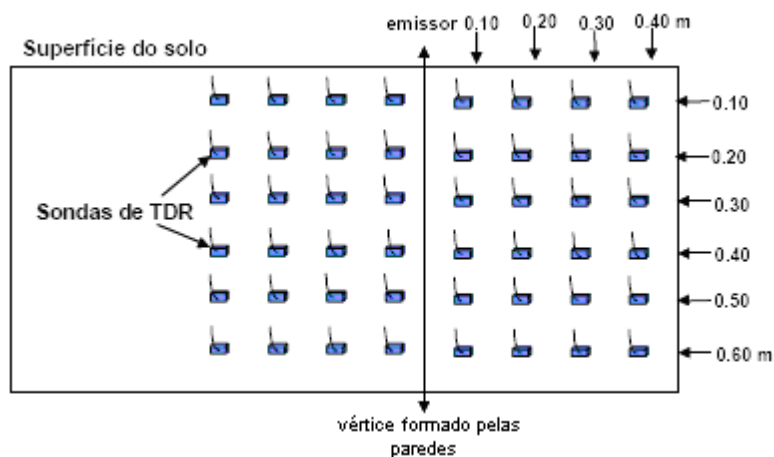


Figura 1. Modelo ilustrativo da disposição das sondas de TDR no volume de solo molhado, no plano.

Um Reflectômetro TDR100 (Campbell Scientific, Logan-Utah) equipado com uma interface RS 232, analisando o sinal eletromagnético automaticamente por um coletor de dados (CR1000 –

Datalogger – Campbell Scientific) foi utilizado para o monitoramento. As sondas foram construídas e calibradas seguindo as metodologias propostas por Souza et al. (2001), Tommaselli et al. (1997).

As sondas de medição foram distribuídas simetricamente em um eixo central, a partir do vértice de duas paredes de solo formando 90° entre si, com espaçamento de 0,10 m constituindo-se numa malha vertical e horizontal, promovendo “medidas pontuais” em duas direções a partir do emissor. A distribuição em vértices visa minimizar a alteração do solo causado pela instalação das sondas. Essa instalação foi realizada em uma trincheira, sendo que a mesma foi fechada com o solo proveniente da sua abertura. As Figuras 2 e 3 mostram a montagem do experimento.



(A)



(B)

Figura 2. (A) Alinhamento horizontal para instalação da sonda. (B) Momento de instalação da sonda.



(A)



(B)

Figura 3. (A) Disposição final das 48 sondas já instaladas. (B) Fechamento da trincheira.

Após 2 meses de espera para que o solo retornasse à condição mais próxima da inicial, as leituras de umidade do solo em todas as posições foram realizadas de forma contínua acompanhando os ciclos de irrigação, isto é, envolvendo a fase de infiltração e redistribuição. Assim, observou-se a formação do bulbo molhado para as vazões de 2, 4 e 8 L h<sup>-1</sup>, aplicando-se os volumes de um litro de água durante 10 aplicações em intervalos de 1 hora, com 3 repetições para cada vazão utilizada. Um sistema com frasco de Mariote foi utilizado para manter a pressão no gotejador constante.

O monitoramento do ensaio foi facilitado devido à automação das sondas de TDR por meio de um multiplexador, o qual possibilitou medições em pequenos intervalos de tempo. Tem-se, na Figura 4, o detalhe dos equipamentos empregados no ensaio. A partir dos resultados da umidade, foram estimados os valores de armazenamento da solução no solo, permitindo calcular a eficiência da aplicação e da distribuição.

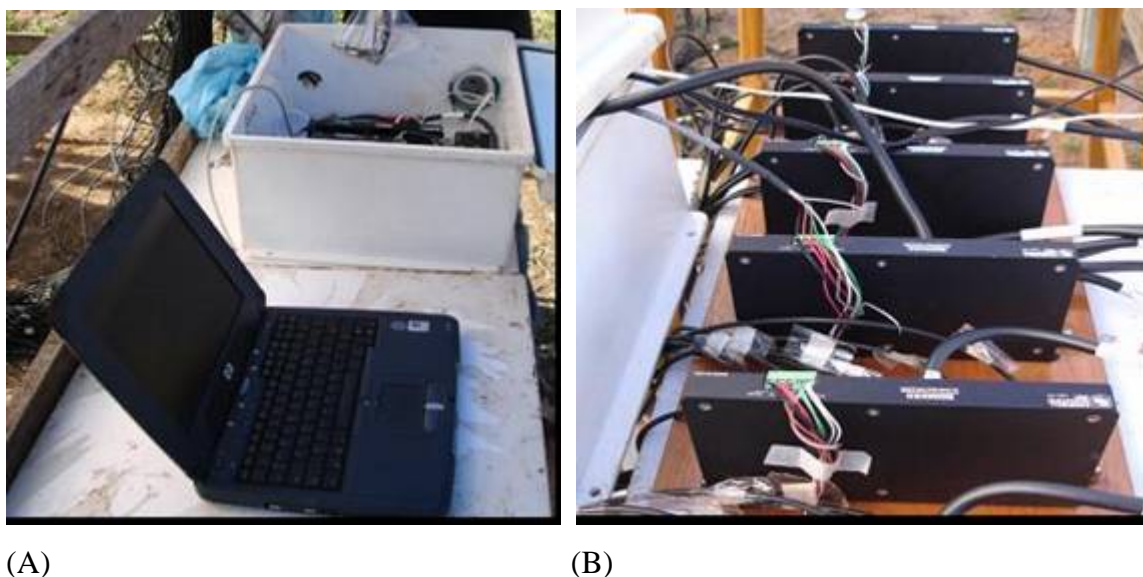


Figura 4. **(A)** Micro-computador e TDR100 utilizados no ensaio. **(B)** Detalhe dos multiplexadores para automação das leituras.

A Figura 5 a seguir mostra os trabalhos realizados no ensaio em campo objetivando o monitoramento da umidade do solo da área experimental.



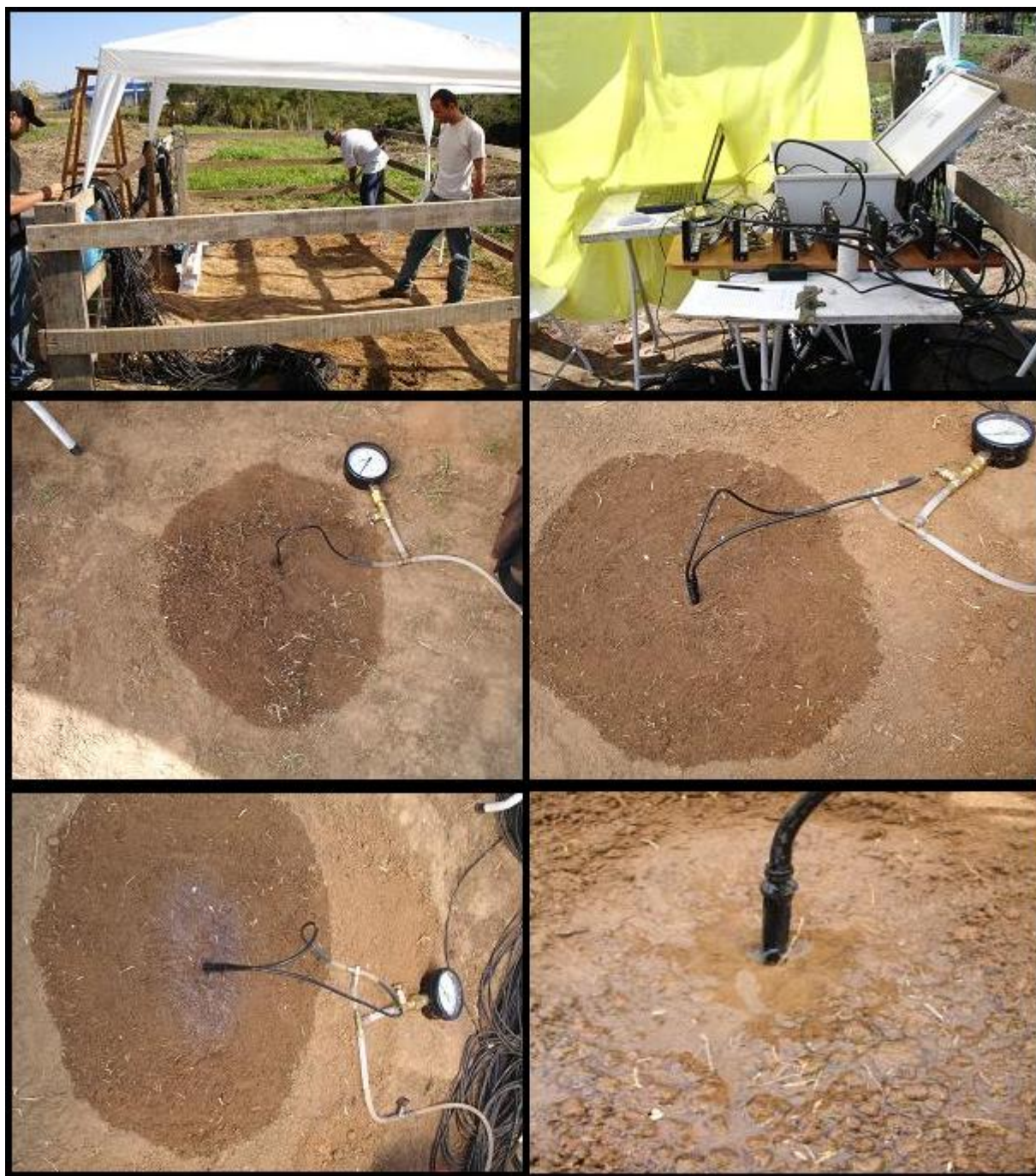


Figura 5. Condução do ensaio no campo.

A partir de uma única sonda pontual foi possível estimar a umidade no solo. Conseqüentemente, a distribuição e o armazenamento da água no solo foram monitorados e contabilizados. Estas medições foram analisadas através do programa “Surfer”, o qual apresentou o perfil de distribuição da umidade do solo, durante todo o ensaio, proporcionando informações básicas sobre a dinâmica da água no solo.

Visando esclarecer a influência de alguns fatores no armazenamento da água no solo, assumiu-se um volume central dentro do bulbo molhado para efetuar uma análise de uniformidade comparativa, com o propósito de entender as diferenças entre os valores de umidade e de concentrações individuais estimadas dentro do volume de controle.

Os resultados da distribuição da água no solo permitiram identificar informações referentes aos efeitos da relação água-solo para um volume radicular qualquer, que podem auxiliar no manejo e minimização de impactos decorrentes da irrigação por gotejamento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através dos resultados experimentais de umidade obtidos com as leituras do aparelho de TDR, observou-se nas primeiras aplicações que os teores de água no perfil estudado mostraram-se com baixa variabilidade. Acredita-se que este efeito tenha ocorrido devido a possíveis imperfeições na compactação do solo e à água já presente no perfil, a qual provavelmente encontrava-se mal distribuída entre as camadas.

No entanto, com a continuidade das aplicações de solução no solo, foi possível observar o aumento gradativo dos teores de água enquanto à frente de molhamento evoluía.

Têm-se, na Figura 6, os perfis de umidade do solo para a vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$ , em 10 aplicações da água a cada uma hora. Verifica-se uma maior evolução da percolação vertical que a horizontal.

A Figura 7 mostra os perfis de umidade do solo para a vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  de aplicação que, se comparados à vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$ , apresentam uma mobilidade vertical evoluindo em menor proporção e a horizontal praticamente equivalendo na amplitude total. Observa-se ainda que a distribuição da água no solo obteve um gradiente maior, uma vez que detectou-se maior volume de solução próximo à superfície e, conseqüentemente, ao gotejador.

Já os perfis de umidade para a vazão de  $8 \text{ L h}^{-1}$ , mostrados na Figura 8, apresentam uma maior evolução do bulbo molhado na direção horizontal contudo, na direção vertical, observa-se uma menor profundidade alcançada pela frente de molhamento. Se comparados à vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$ , estes perfis apresentam um maior gradiente hidráulico, visto que a diferença entre a maior e a menor umidade ocorrente, dividida pela profundidade do bulbo molhado, é maior.

As leituras nas diferentes sondas foram realizadas rapidamente, pois foram facilitadas usando-se um equipamento multiplicador de canais “multiplex”. Assim, cada ensaio demandou menor tempo que o esperado, tendo sido gastos 4 minutos para se realizar as leituras das 48 sondas ao final de cada aplicação.

Alguns problemas observados no ensaio foram: constatação de diferentes umidades iniciais nas camadas do solo, conforme já exposto, e a deformidade na formação do disco saturado (poça d'água que permanece sobre o solo durante o processo de infiltração), bem como no avanço da frente de umedecimento na superfície do solo.

Isto pode ser explicado devido à pequena inclinação do terreno escolhido para instalação do experimento e às condições estruturais do solo durante a realização do ensaio.

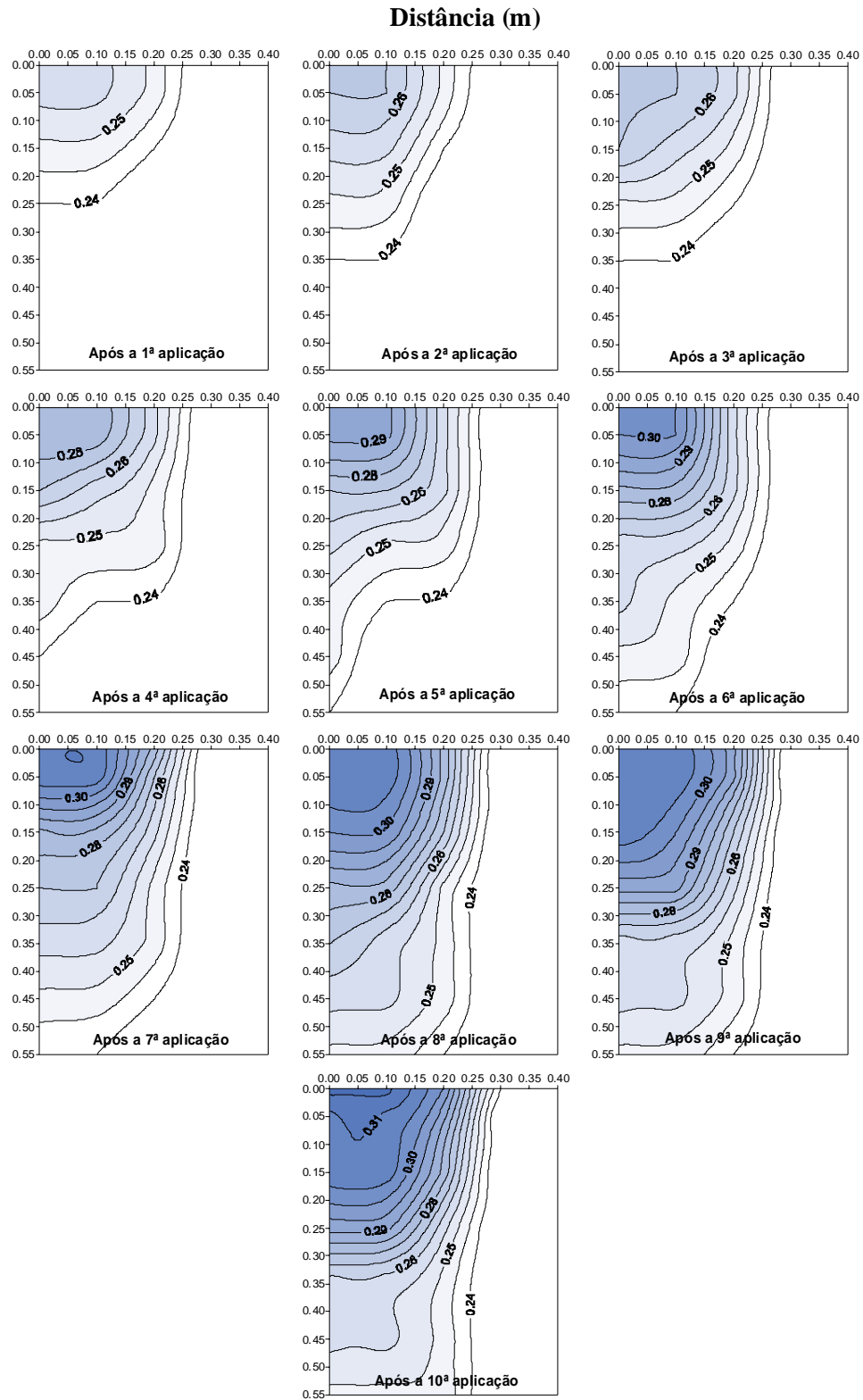


Figura 6. Perfis de umidade do solo ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de solução para vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$ .



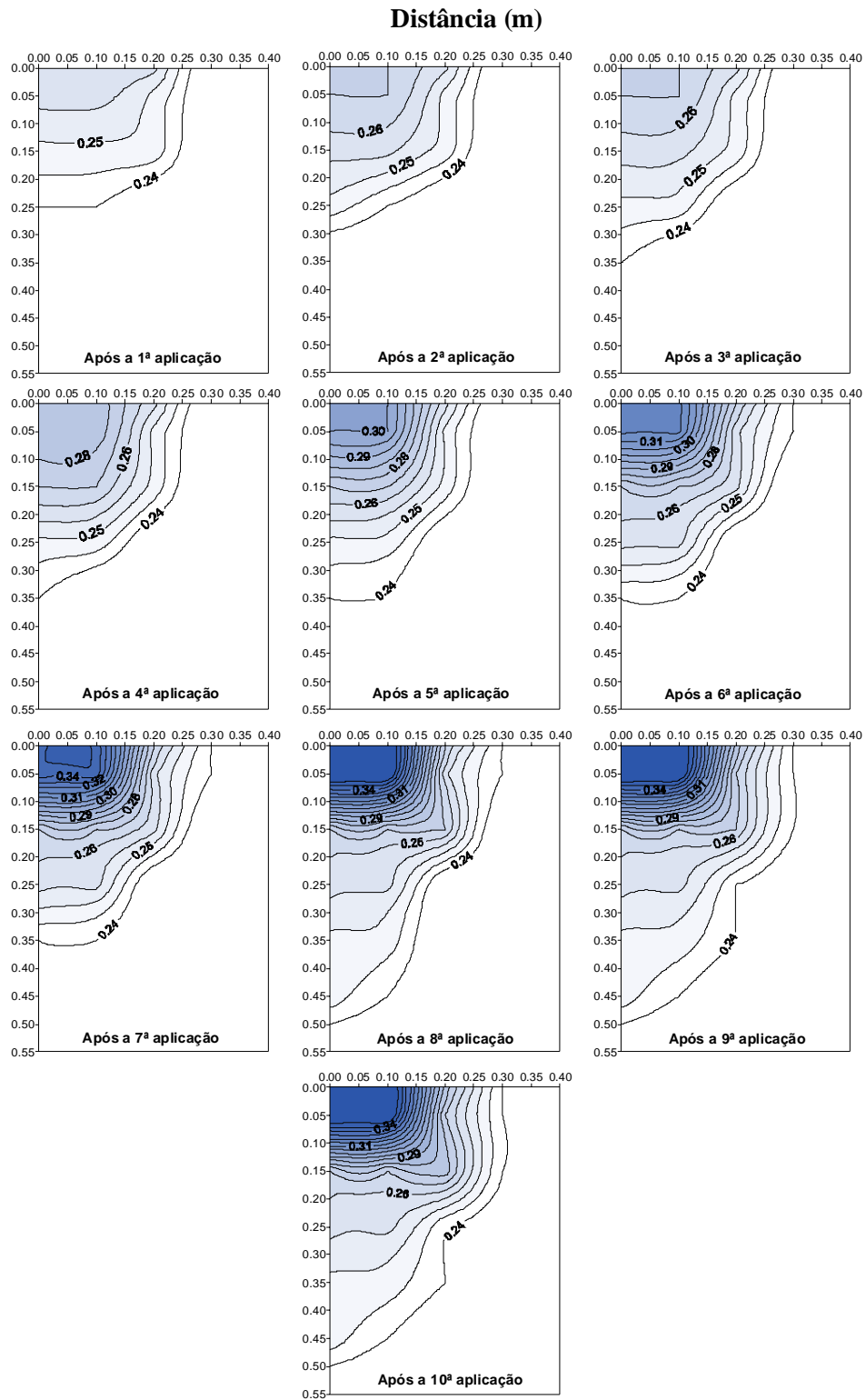


Figura 7. Perfis de umidade do solo ( $\text{m}^3.\text{m}^3$ ) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de solução para vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$ .

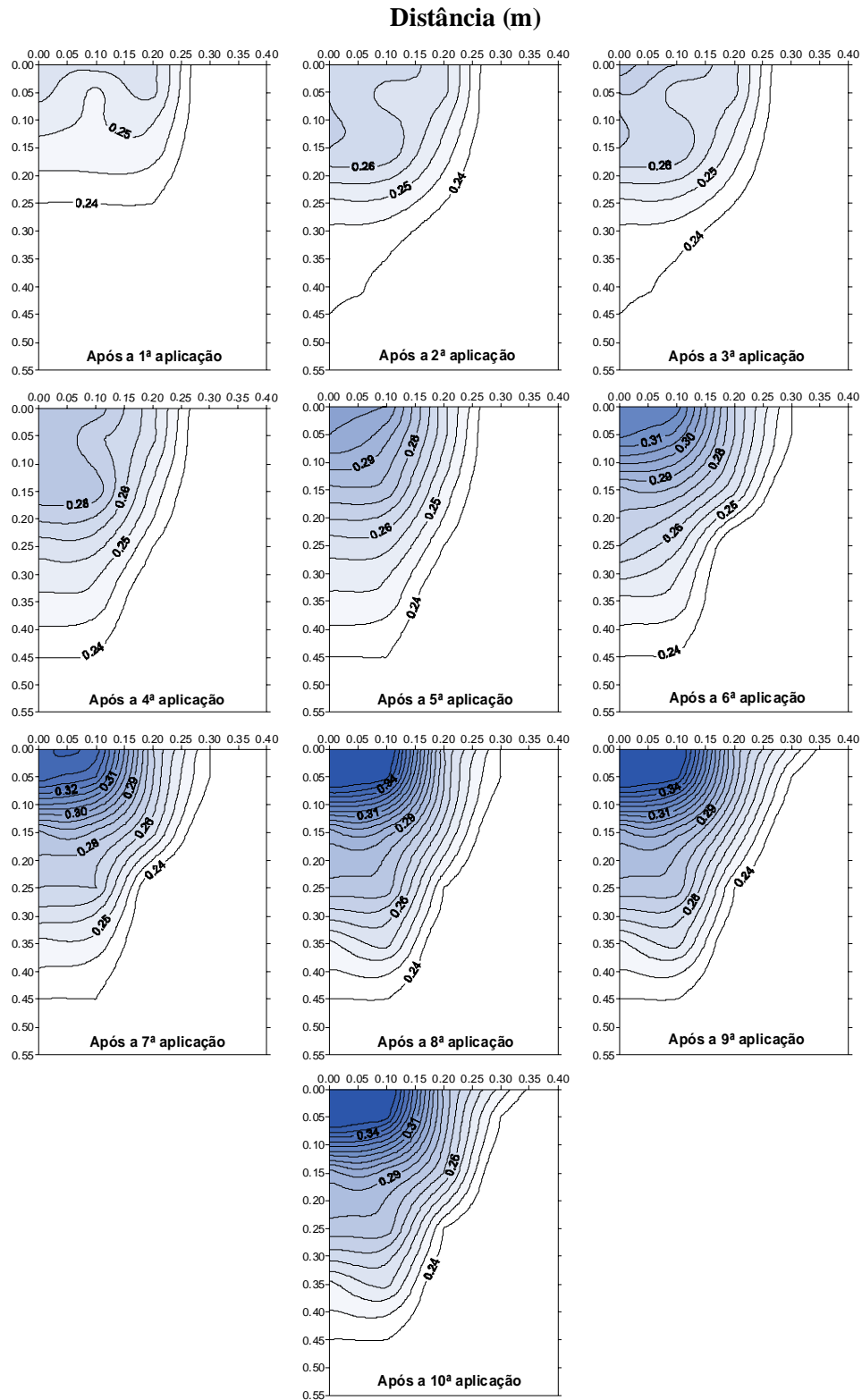


Figura 8. Perfis de umidade do solo ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de solução para vazão de  $8 \text{ L h}^{-1}$ .

### **Distribuição e armazenamento da água no solo**

Por ocasião da vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$ , o maior armazenamento ocorreu na camada de 0-0,10 m durante todas as aplicações, finalizando com uma umidade média de 31% nesta faixa. Monitorou-se o movimento da solução para a 3ª camada (0,30-0,40 m) já após a 2ª aplicação. Após a 4ª aplicação atingiu a 5ª camada (0,40-0,50 m) e, após a 5ª aplicação atingiu a 6ª e última camada (0,50-0,55). Percebe-se que a partir da 6ª aplicação à frente de molhamento ultrapassou a última linha de sondas instaladas, o que interferiu na caracterização do bulbo molhado a partir deste ponto.

Em relação à vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$ , também nota-se um maior armazenamento de solução na camada de 0-0,10 m, perfazendo uma umidade final média de 33% nesta primeira faixa. Na segunda aplicação à frente de molhamento atinge a 3ª camada (0,20-0,30 m). Somente após a 6ª aplicação, observa-se o movimento da solução até a 4ª camada (0,30-0,40 m) e, após a 8ª aplicação, já atingiu a profundidade final do bulbo molhado. Vê-se neste caso, que a maior parcela de água ficou retida nas duas primeiras camadas do perfil de solo.

Com uma vazão de  $8 \text{ L h}^{-1}$ , observa-se uma umidade final média de 34% na faixa de maior armazenamento de solução (0-0,10 m). Já após a 2ª aplicação, nota-se que o comprimento vertical máximo do bulbo molhado foi alcançado, permanecendo estático a 0,45 m de profundidade. A partir desta mesma aplicação observa-se um aumento gradativo da área superficial molhada, que ao final de todo processo alcança 0,7 m de diâmetro, e da umidade na área mais próxima ao gotejador, na qual a maior parcela da solução ficou retida.

Segundo Favaro (2005), resultados em condições de laboratório demonstraram haver uma relação entre o armazenamento da solução dentro do bulbo molhado no qual, aumentando-se o volume aplicado, o armazenamento da água foi direcionado para a camada mais profunda do perfil do solo.

Neste ensaio realizado em condições de campo, a solução aplicada também foi direcionada para camadas mais profundas, aumentando-se o volume de água no solo. Porém, constatou-se haver uma relação proporcional entre uma maior vazão de aplicação com um bulbo molhado de menor profundidade, mas com maior amplitude horizontal, gradiente hidráulico e área superficial molhada.

### **Uniformidade de distribuição da água no solo**

Com o propósito de se entender as diferenças entre os valores de umidade individual estimada dentro de um volume de controle, assumiu-se um volume de solo central no bulbo molhado para efetuar uma análise de uniformidade de distribuição comparativa. Desta forma, foi possível calcular

os coeficientes de uniformidade de Christiansen (1941) para as umidades estimadas após cada aplicação da solução, nas vazões de  $2 \text{ L h}^{-1}$ ,  $4 \text{ L h}^{-1}$  e  $8 \text{ L h}^{-1}$ , por meio da equação abaixo, seguindo-se a metodologia adaptada por Ould Mohamed El-Hafedh et al. (2001) e Wu & Gitlin (1983).

$$CUC = 100 \left[ 1 - \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{\bar{X} N} \right]$$

onde,

CUC = Coeficiente de uniformidade de distribuição de Christiansen (%);

$X_i$  = Umidade volumétrica estimada ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ );

$\bar{X}$  = Umidade volumétrica média ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ );

N = Número de pontos estimados.

O volume de controle escolhido foi de  $0,30 \times 0,30 \times 0,40 \text{ m}$ , respectivamente, comprimento, largura e profundidade, no qual o gotejador foi posicionado no ponto central.

A Figura 9 apresenta uma avaliação da umidade média no volume de controle adotado, ajudando a se entender alguns problemas relacionados à uniformidade de distribuição da solução no solo.

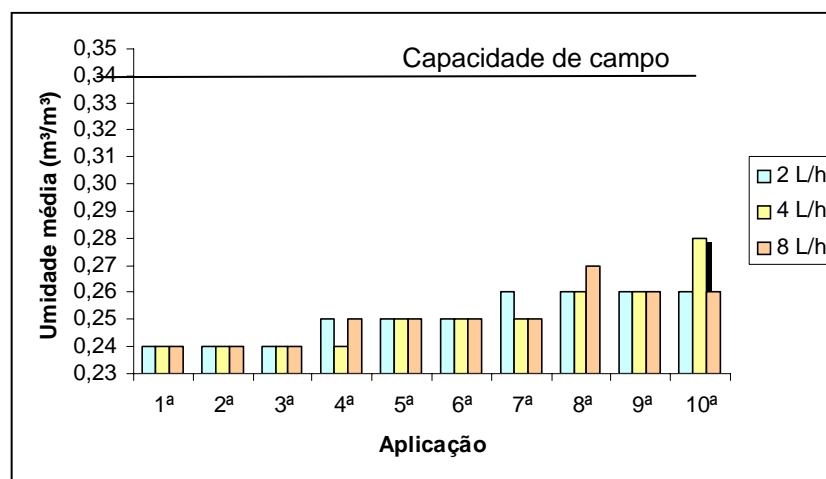


Figura 9. Umidade média no volume de controle.

Verifica-se que a capacidade de campo do solo não foi atingida em nenhum momento ao decorrer das aplicações da solução sob as vazões adotadas, no entanto, as umidades médias foram aumentando proporcionalmente com o volume de água no solo, exceto na vazão de  $8 \text{ L.h}^{-1}$  cujo pico de umidade foi observado após a 8ª aplicação.

Com os dados disponíveis, pode-se dizer que não foi constatada a estabilização da umidade média, demonstrando que a distribuição da água foi dependente do volume aplicado, sendo observados valores de umidade pontuais de até  $0,36 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$  ( $8 \text{ L h}^{-1}$ ).

Na Figura 10 têm-se os valores da uniformidade de distribuição da água no solo, após cada aplicação de água sob as vazões utilizadas, fornecendo algumas informações para se entender os fatores prejudiciais à eficiência do sistema como um todo.

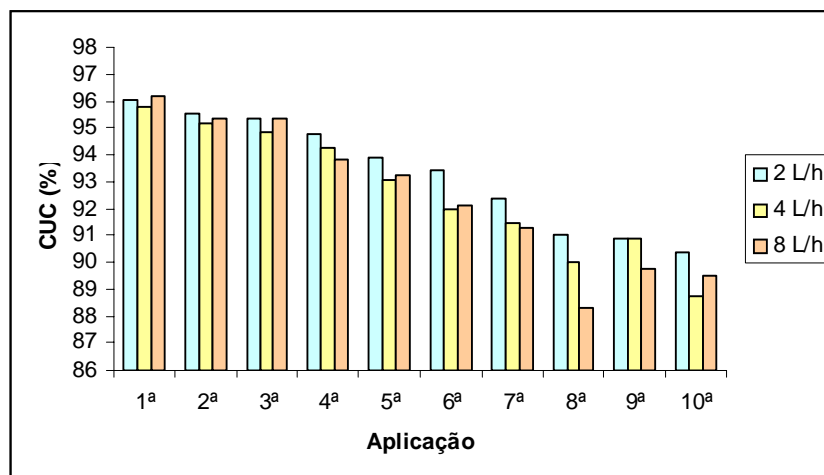


Figura 10. Coeficiente de uniformidade de distribuição da solução no solo.

Fazendo-se uma análise comparativa entre as vazões adotadas, nota-se que na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  os valores de uniformidade mostraram-se os melhores após a 4ª aplicação. Talvez este fenômeno possa ter uma relação com a maior mobilidade vertical alcançada pela água, bem como com o menor gradiente hidráulico constatado para a situação.

No geral, observa-se nas três situações de vazão que o maior coeficiente de uniformidade de distribuição (CUC) ocorre após a 1ª aplicação. A partir daí percebe-se um decréscimo gradativo do CUC, situação esta, persistente até a 10ª e última aplicação da solução. Por outro lado, os resultados mostram ocorrer uma boa distribuição da solução no solo, uma vez que a disponibilidade dos nutrientes de forma homogênea na região do sistema radicular da cultura é estimada para coeficientes de uniformidade superiores a 80%.

Pelo exposto pode-se afirmar, para este ensaio, que o efeito de aplicação de maiores volumes de solução não teve importância para a melhoria do CUC. Entretanto, o aumento do volume aplicado demonstrou agir diretamente no movimento da água para as camadas inferiores do solo, fortalecendo a idéia de que existe a sensibilidade da dinâmica da água perante as variações de condutividade hidráulica.

## Considerações finais

Tomando-se como referência uma profundidade de 0,40 m de sistema radicular efetivo médio, como é o caso de algumas culturas como berinjela, tomate rasteiro, pepino, batata, beterraba, ervilha, soja, arroz, banana, entre outras, pôde-se observar a ocorrência de perdas de solução por lixiviação através da área hipotética de absorção de nutrientes pelas plantas (50% do comprimento da raiz), acarretando em desperdício de água e nutrientes e caracterizando uma possível fonte de poluição de águas subterrâneas e superficiais por nitrato.

Por ocasião da vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$ , exibida na Figura 11, percebe-se perda de água após a 4ª aplicação. Dentre as situações simuladas neste ensaio, esta se mostra mais problemática em relação à prevenção de desperdícios e minimização de riscos de poluição ambiental, uma vez que ocorre uma lixiviação excessiva através da profundidade de referência.

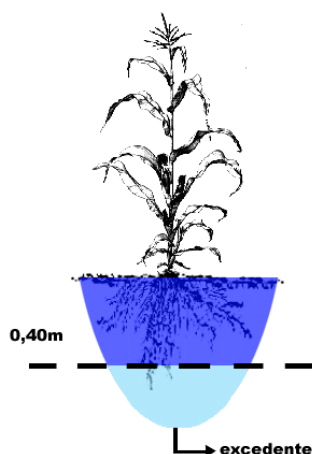


Figura 11. Esquema ilustrativo da dimensão final do bulbo molhado na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$ .

Na Figura 12, tem-se a situação quando da vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$ . Percebe-se que a partir da 8ª aplicação foi perdida parcela da solução aplicada, porém em menor proporção que na aplicação de  $2 \text{ L h}^{-1}$  de água de irrigação.

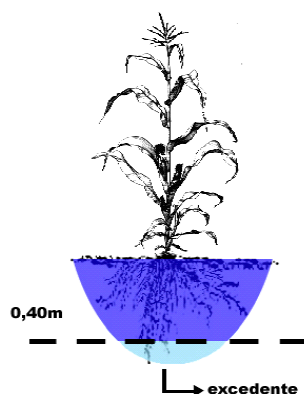


Figura 12. Esquema ilustrativo da dimensão final do bulbo molhado na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$ .

Mais amena mostrou-se à situação de vazão de  $8 \text{ L h}^{-1}$ , com excesso de solução apenas a 0,05 m através da referência, conforme mostrado na Figura 13.

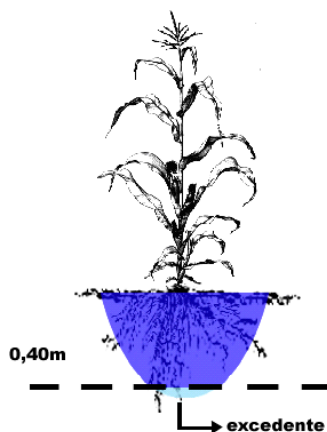


Figura 13. Esquema ilustrativo da dimensão final do bulbo molhado na vazão de  $8 \text{ L h}^{-1}$ .

Baseando-se nos resultados obtidos com o presente trabalho, algumas alternativas podem ser levadas em consideração para aumentar a eficiência da fertirrigação por gotejamento, conseqüentemente minimizando o risco de poluição ambiental:

1) Quando da utilização de culturas cujo sistema radicular seja do tipo pivotante (Figura 14), que penetra perpendicularmente ao solo e geralmente atinge maiores profundidades, recomenda-se a aplicação de pequenos volumes de solução, porém com maior frequência;

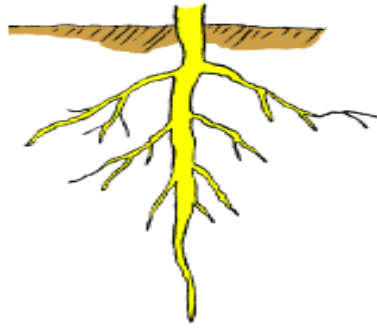


Figura 14. Sistema radicular do tipo pivotante.

2) Quando do cultivo de espécies com o sistema radicular fasciculado, ou seja, que não tem desenvolvimento acentuado e está distribuído mais superficialmente no solo, recomenda-se aplicação do mesmo volume, contudo dividindo-o entre dois gotejadores ou mais. Desta maneira, ocorrerá à formação de mais bulbos próximos entre si, atingindo então, uma maior amplitude horizontal de umedecimento do solo.

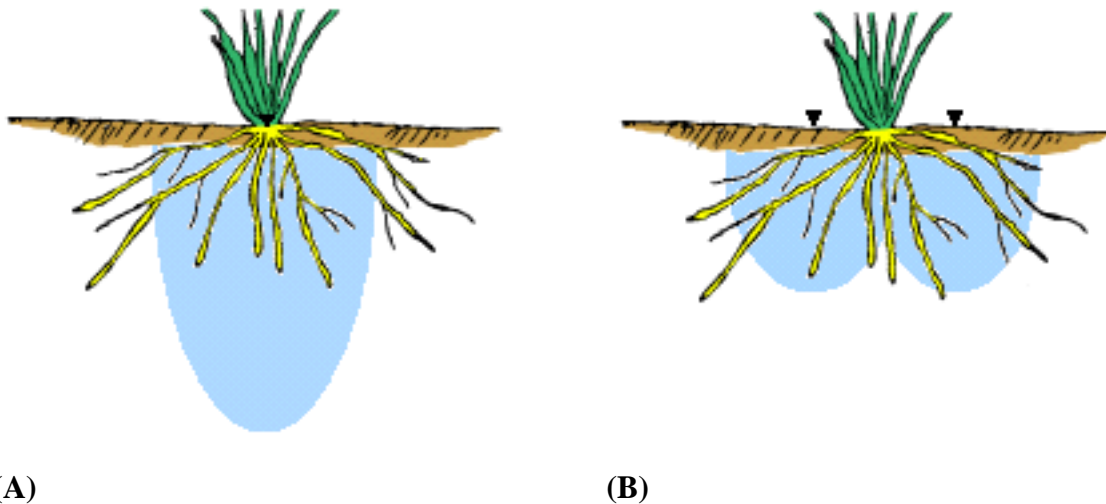


Figura 15. (A) Área molhada quando aplicado um volume qualquer utilizando 1 gotejador. (B) Área molhada quando se divide a aplicação de um volume qualquer entre 2 gotejadores.

A Figura 15 (A) mostra uma área molhada mais profunda e com menor propagação horizontal. Percebe-se que neste caso não ocorre uma distribuição de solução adequada ao potencial de aproveitamento pela planta, observando-se a perda de um grande volume da solução através do comprimento das raízes.



Já na Figura 15 (B) a probabilidade de ocorrer um melhor aproveitamento da água e dos nutrientes pelo sistema radicular é maior, portanto, proporcionando maior eficiência de aplicação da água de irrigação.

## CONCLUSÕES

1) Observou-se nas interações entre os diferentes perfis, uma distribuição em gradiente da solução no solo, sendo verificado um maior armazenamento da solução próximo ao gotejador e, logo, uma diminuição desta à medida que se aproxima da frente de molhamento;

2) Sugere-se para a redução das perdas de água e nutrientes por percolação e lixiviação respectivamente, a aplicação de pequenos volumes de solução durante a irrigação, porém com maior frequência.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSAF, R.; LEVIN, I.; BRAVDO, B.A. Optimization of water for fruit trees by a computerized irrigation system. **Agronomy Journal**, Madison, v.9, p.451-456, 1989.

COELHO, E.F.; ARRUDA, F.B. Aplicações da técnica de TDR: Manejo de água no solo. In: Matura, E.E.; Javarez Junior, A.; Gomes, E.P.; Souza C.F. (ed.). **Aplicações da técnica da TDR na Agricultura**. Campinas: Feagri/Unicamp, 2001. cap. 7, p. 129-145.

CHRISTIANSEN, J. E. The uniformity of application of water by sprinkler systems. **Agricultural Engineering**; St. Joseph, v. 22, p. 89-92, 1941.

CLOTHIER, B.E.; SCOTTER, D.R.; HARPER, E.R. Three-dimensional infiltration and trickle irrigation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.28, p.497-501, 1985.

DASBERG, S.; OR, D. **Drip irrigation**. Berlin: Springer, 1999, 162p.

FAVARO, R. B. T. **Estudo da metodologia de TDR para avaliar os impactos causados pelo nitrato aplicados via fertirrigação.** Trabalho Final de Graduação. Taubaté: UNITAU, 2005, 51p.

KELLER, J.; BLIESLER, R. **Sprinkle and trickle irrigation.** New York, 1990: Van Nostrand Reinhold, 652 p.

OULD MOHAMED EL-HAFEDH, A. V.; DAGHARI, H.; MAALEJ, M. Analysis of several discharge rate-spacing-duration combinations in drip irrigation system. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 52, p. 33-52, 2001.

OR, D. Drip irrigation in heterogeneous soils: study-state field experiments for stochastic model evolution. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, p.1339-1349, 1996.

RANDALL, H.C.; SALVATORE, J.L. Root growth and water status of trickle-irrigated cucumber and tomato. **Journal of the American Society Horticultural Science**, Mount Vernon, v.113, p.830-835, 1988.

SHRIVASTAVA, P.K.; PARIKH, M.M; SAWANI, N.G.; RAMAN, S. Effect of drip irrigation and mulching on tomato yield. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.25, p.179-184, 1994.

SOUZA, C. F.; SANDRI, D.; MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R. **Construção de sondas de TDR para a irrigação.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, Foz do Iguaçu. Anais... Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. CD-ROM

SOLOMON, K.; KELLER, J. Trickle irrigation uniformity and efficiency. **J. Irrig. Drain. Eng. ASCE**, v.104, p.293-306, 1978.

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. Distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, n.1, p.7-15, 2004.

TOMMASELLI, J.T.G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time Domain Reflectometry)**. Tese de Doutorado. Piracicaba: ESALQ-USP, 1997, 167p.

WU, I.P.; GITLIN, H.M. Drip irrigation application efficiency and schedules. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.26, p.