

AVALIAÇÃO EM CAMPO DE UM TDR PARA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE

¹Garzella, T.C., ²Molin, J.P.

RESUMO: A técnica do TDR, para determinação de umidade, vem recebendo significativo enfoque, haja vista a mensuração em tempo real, a possibilidade de leituras automatizadas e a aplicação em agricultura de precisão. Entretanto, o uso desta técnica é restringido pelo elevado custo dos equipamentos e, em geral, pela necessidade de calibração. Assim, o objetivo desse trabalho foi verificar o estado de calibração de um TDR em condições de campo. O aparelho utilizado pertence ao Projeto AP, do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ-USP, local onde foi desenvolvido o trabalho. Estabeleceu-se 15 pontos geo-referenciados de amostragem numa área de solo conhecido, cultivada com maracujá e com um sistema de irrigação instalado. Foram realizados dois testes de campo, em diferentes condições de umidade, nos quais determinou-se em cada ponto e com três repetições, a umidade via TDR e via método da estufa. Com os resultados, executou-se uma análise de regressão e elaborou-se mapas interpolados da umidade determinada pelos dois métodos, a partir dos quais realizou-se uma análise de correlação. O primeiro teste apresentou coeficiente de regressão de 0.56 e de correlação de 0.85, enquanto que para o segundo, os coeficientes de regressão e correlação foram, respectivamente, de 0.82 e 0.88. Conclui-se que apesar da elevada correlação entre os métodos, os coeficientes de regressão obtidos justificam a realização de um procedimento de calibração. Mais informações em <http://www.ciagri.usp.br/~garzella>.

¹Bolsista de Iniciação Científica do Departamento, ²Prof. Dr., Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP

INTRODUÇÃO

Na agricultura atual, dá-se grande importância aos sistemas de irrigação, os quais são responsáveis por significativos incrementos na produtividade das culturas, além de permitirem a exploração de áreas cujo elevado potencial produtivo é limitado pelo regime hídrico. Em função dos avanços tecnológicos observados tanto no âmbito das indústrias que fabricam equipamentos para irrigação, quanto na área do conhecimento agrônomo sobre as relações água-solo-planta, os processos de tomada de decisão visando uma otimização da prática da irrigação tornam-se cada vez mais dependentes de informações (FRIZZONE e BOTREL, 1996).

Nesse contexto, a monitoração da quantidade de água disponível no solo às culturas mostra-se essencial, vindo a exigir métodos e instrumentos de determinação de umidade cada vez mais eficientes.

JENSEN *et al.* *apud* OLIVEIRA (2000), já afirmava que nos últimos vinte anos, o potencial para se melhorar o manejo da irrigação aumentou-se substancialmente devido, entre outros fatores, principalmente à disponibilidade comercial de instrumentos de medição da umidade do solo para determinação de quando e quanto irrigar. SILVA (1998), descreve que um método ideal seria aquele que usasse uma propriedade física do solo altamente correlacionada ao seu teor de água. Essa propriedade deveria ser confiável e capaz de ser avaliada diretamente no campo sem alterações das características físicas do solo. DAVIS e CHUDOBIAK (1975) sugerem que a constante dielétrica do solo poderia ser utilizada para esse fim, introduzindo a técnica da reflectometria no domínio do tempo (Time Domain Reflectometry – TDR).

Atualmente, a técnica do TDR tem sido objeto de inúmeros estudos visando sua utilização para determinação do teor de água no solo, tendo em vista suas características desejáveis, dentre as quais destacam-se a mensuração em tempo real, a possibilidade de leituras automatizadas e de integração com sistemas de controle de irrigação (CICHOTA e LIER, 2002), e a aplicação em agricultura de precisão.

Seu funcionamento tem por princípio a permissividade, grandeza que caracteriza o comportamento dielétrico dos materiais. Utiliza-se da permissividade relativa, ou mais comumente conhecida como constante dielétrica, a qual é definida pela razão da permissividade de um material pela do vácuo. Dessa forma, a permissividade relativa indica em quanto a capacitância de um capacitor aumenta ao substituir o vácuo como material dielétrico, pelo material em questão.

Pelas teorias do magnetismo, sabe-se que a velocidade de um pulso eletromagnético em um meio condutor é dada pela razão entre a velocidade da luz no vácuo e a raiz quadrada da constante dielétrica do material circundante. A equação (1) expressa a relação citada.

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (1)$$

Sendo v = velocidade do pulso ($m.s^{-1}$), c = velocidade da luz no vácuo ($3.10^8 m.s^{-1}$) e k = permissividade relativa ou constante dielétrica.

Por essa relação, tem-se que as interações eletromagnéticas provocam um retardamento no pulso a medida em que alteram a constante dielétrica do meio. Obtendo-se a velocidade do pulso pode-se, por conseqüência, determinar a constante dielétrica do meio.

O procedimento padrão que permite o cálculo da velocidade de propagação é emitir, através de uma haste metálica de um dado comprimento L , um pulso de voltagem que irá se propagar até o final da haste, onde encontrará um estrangulamento eletrônico causado pela

mudança de impedância. Devido ao estrangulamento, um pulso ressonante retornará até o início da haste, permitindo a medição do tempo transcorrido entre a emissão do pulso e a recepção do eco.

Encontrando-se o tempo e conhecendo-se o comprimento L da haste, pode-se calcular a velocidade de propagação do pulso, pela relação expressa na equação (2).

$$v = \frac{2 \times L}{t} \quad (2)$$

Sendo v = velocidade do pulso ($m.s^{-1}$), L = comprimento da haste (m) e t = tempo (s).

Com as equações (1) e (2), obtém-se a equação (3), a qual permite determinar a constante dielétrica do meio.

$$k = \left(\frac{t \times c}{2 \times L} \right)^2 \quad (3)$$

Sendo k = constante dielétrica, c = velocidade da luz no vácuo ($3.10^8 m.s^{-1}$), t = tempo (s) e L = comprimento da haste (m).

A constante dielétrica da água é significativamente maior que a dos demais constituintes do solo, fazendo com que a variação no teor de água seja o principal fator responsável pela determinação da constante dielétrica aparente do solo. A Tabela 1 apresenta os valores da constante dielétrica de alguns constituintes do solo.

Tabela 1. Constante dielétrica de alguns constituintes do solo.

Material	Constante Dielétrica
Ar	1
Água (20°C)	80
Gelo (-3°)	3
Basalto	12
Granito	7-9
Silte seco	3,5
Areia seca	2,5

Fonte: Curtis e Defendorf *apud* Cichota (2003).

CICHOTA (2003) cita alguns estudos sobre o comportamento da constante dielétrica aparente do solo e sua relação com a quantidade de água. TOPP *et al.* (1980) apresentaram uma relação entre umidade e constante dielétrica aparente do solo, que poderia ser utilizada para uma ampla diversidade de solos, sendo praticamente independente do teor de sais, da textura e densidade do mesmo. Com base nesta relação é que a maioria dos equipamentos de TDR determinam a umidade do solo em função de sua constante dielétrica.

Entretanto, é consenso entre pesquisadores do assunto (SILVA, 1998; CICHOTA, 2003; TOMMASELLI, 1997, entre outros) que a relação proposta por TOPP *et al.* (1980) não possui aplicabilidade

universal, uma vez que alguns atributos do solo podem conferir erros às medições. Por exemplo, em solos tropicais, o elevado teor de óxido de ferro frequentemente constitui-se como fonte significativa de erros (TOMMASELLI, 1997).

CICHOTA e LIER (2002) e SILVA (1998) afirmam ser fundamental a execução de um procedimento de verificação e ajuste da relação proposta por TOPP *et al.* (1980) para condições locais de solo, a fim de se obter resultados confiáveis.

Assim, admitiu-se como objetivo primordial desse trabalho realizar a calibração em condições de campo de um equipamento de TDR não segmentado, para um solo classificado como Terra Roxa Estruturada, localizado em Fazenda Experimental pertencente à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP, no município de Piracicaba, SP.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a execução dos testes de calibração, utilizou-se de um experimento com uma cultura de maracujá, conduzido numa área de 0,45 ha, localizada na Fazenda Areão, pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba – SP. O experimento faz parte de um projeto de mestrado, e por isso, já possui instalado na área um sistema de irrigação por gotejamento, bem como oito lisímetros e duas micro-estações climatológicas. O solo da área é classificado como Terra Roxa Estruturada, tendo algumas de suas características físicas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características físicas do solo da área experimental.

Camada (cm)	θ_{cc} ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	θ_{pmp} ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	Densidade ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
0-20	0.4148	0.3472	1.49	62.40	17.20	20.40
20-40	0.4193	0.3491	1.46	69.43	13.83	16.74
40-60	0.4500	0.3808	1.43	68.89	13.63	17.48

Utilizou-se de um equipamento de TDR portátil, cujo modelo é TDR 300, fabricado pela Field Scout e pertencente ao Projeto AP, do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ-USP. Diferentemente da maioria dos equipamentos, o TDR cujo enfoque é dado neste trabalho utiliza-se da reflectometria no domínio do tempo apenas para determinação do conteúdo volumétrico de água no solo, não permitindo obtenção do gráfico característico da condutividade

elétrica pela distância. A Figura 1 apresenta uma ilustração do respectivo equipamento.



Figura 1. Equipamento de TDR modelo TDR300.

Para se avaliar o TDR, estabeleceu-se 15 pontos de amostragens nos quais realizou-se a determinação de umidade com o método gravimétrico em estufa a 105°C e com o equipamento de TDR, utilizando-se de três repetições para cada um dos métodos. Dessa forma, realizava-se a coleta de três amostras deformadas de solo para determinação em laboratório, enquanto obtinham-se três determinações de umidade com o equipamento de TDR, cuja leitura é instantânea.

Tem-se na Figura 2, um mapa da área experimental.

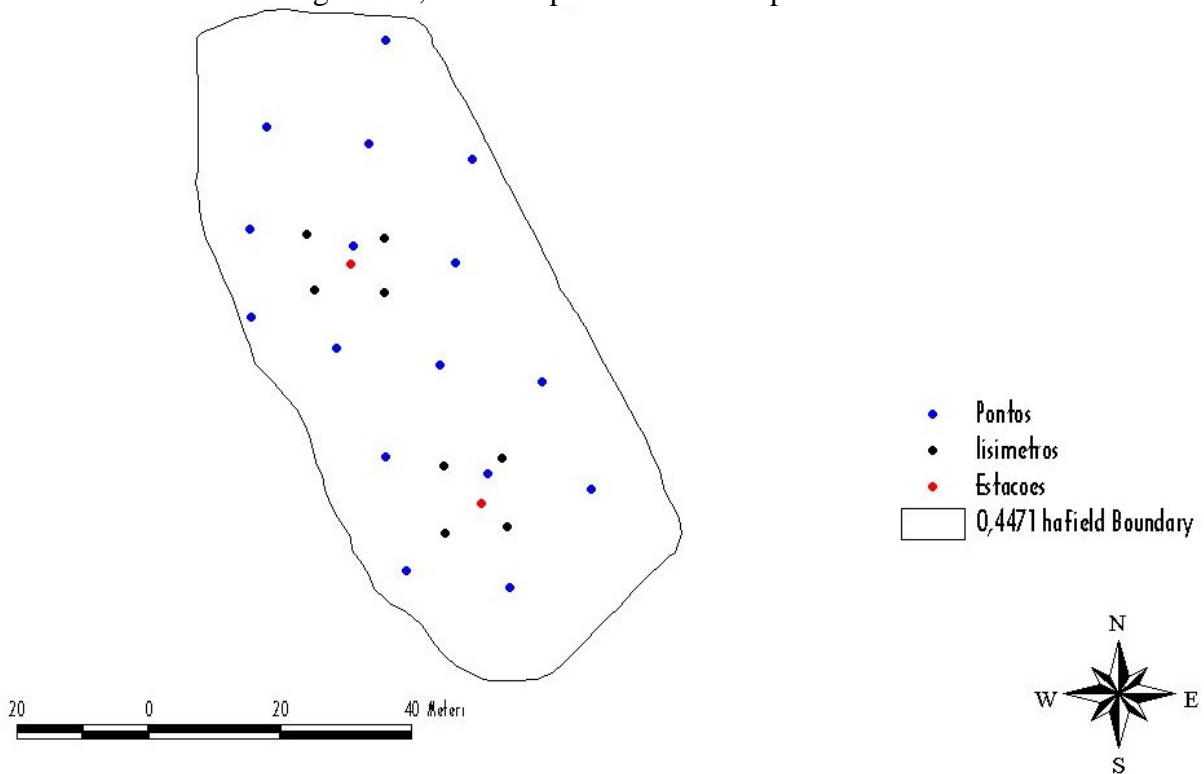


Figura 2. Mapa geo-referenciado da área experimental.

O sistema de irrigação instalado permitiu a execução dos testes sob diferentes condições de umidade. Realizou-se, até o término deste relatório, dois testes em campo, os quais ocorreram nos dias 24 de abril e 27 de agosto de 2004.

Os resultados foram avaliados de duas formas distintas. Para os valores de cada ponto, realizou-se uma análise de regressão, relacionando as medições do aparelho de TDR com as determinações via método padrão de estufa. Para essa análise, tinha-se um total de 45 determinações por método.

O processamento dos dados de cada ponto em um SIG, caracterizou-se pela segunda forma de análise dos dados. Para tanto, gerou-se, a partir da interpolação dos valores de cada ponto, mapas espacializados da umidade determinada pelos dois métodos. Tendo-se por base os mapas gerados, realizou-se uma análise de correlação entre os métodos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos valores de umidade obtidos em cada ponto, tornou-se possível a construção de dois gráficos relacionando as medições realizadas com o equipamento de TDR com as determinações de umidade realizadas através do método da estufa a 105°C.

O gráfico apresentado na Figura 3 refere-se ao primeiro teste, realizado dia 24 de abril, enquanto que o apresentado na Figura 4, ao segundo teste, o qual foi realizado dia 27 de agosto.

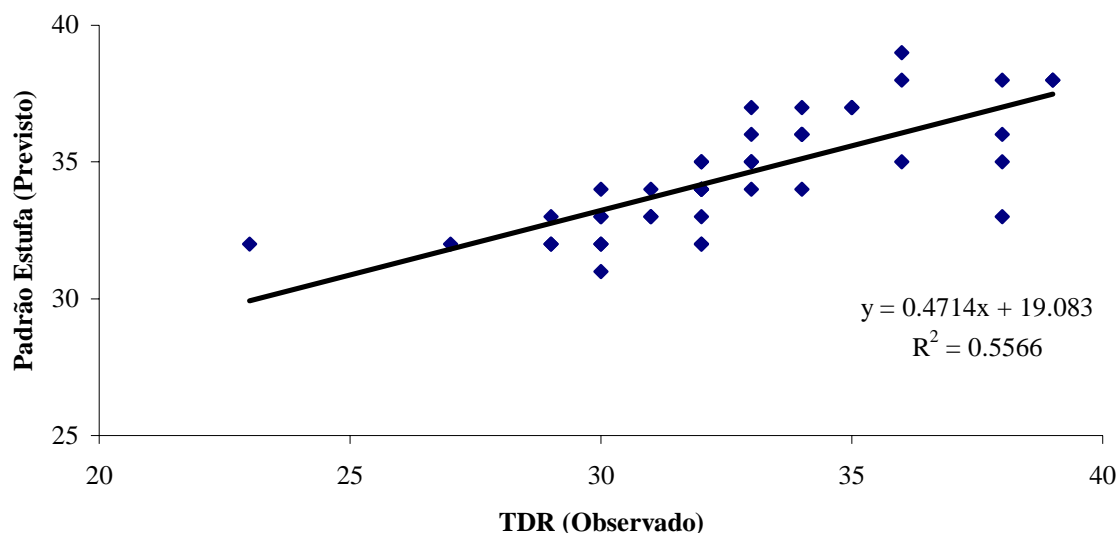


Figura 3. Gráfico umidade determinada pelo TDR x umidade determinada pelo método da estufa, no dia 24 de abril de 2004.

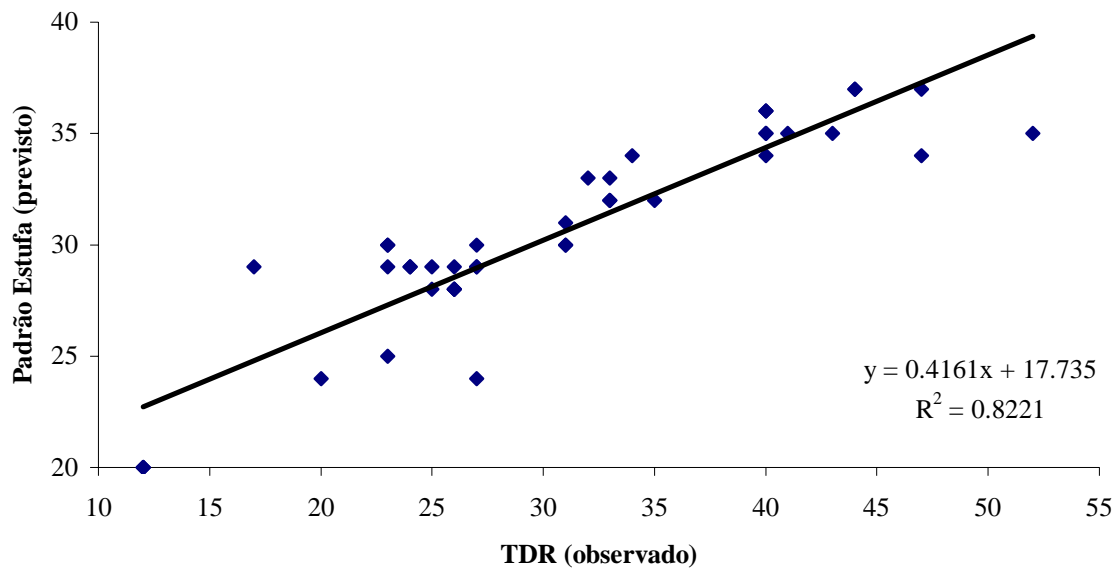


Figura 4. Gráfico umidade determinada pelo TDR x umidade determinada pelo método da estufa, no dia 27 de agosto de 2004.

Em ambos os gráficos, foram eliminados pontos cujos valores eram considerados discrepantes. Ainda para elaboração dos mesmos, como o equipamento de TDR fornece o resultado apenas em número inteiro, aproximou-se os valores obtidos pelo método da estufa para o valor inteiro mais próximo, não se trabalhando com casas decimais.

Na Figura 1, pode-se verificar um coeficiente de regressão (R^2) de 0,55, valor considerado insatisfatório. Já na Figura 2, uma maior relação entre o TDR e o método da estufa é caracterizada pelo coeficiente de regressão de 0,82. Entretanto, este valor mostra-se insuficiente quando comparado com os valores obtidos nos trabalhos de CICHOTA (2003), SILVA (1998) e TOMMASELLI (1997), cujos coeficientes ficaram em torno de 0,92.

Utilizando-se de um SIG, tornou-se possível a obtenção de mapas espacializados da umidade na área em estudo, conforme citado anteriormente. O mapa para o primeiro teste é apresentado na Figura 5, enquanto que o do segundo teste, na Figura 6.

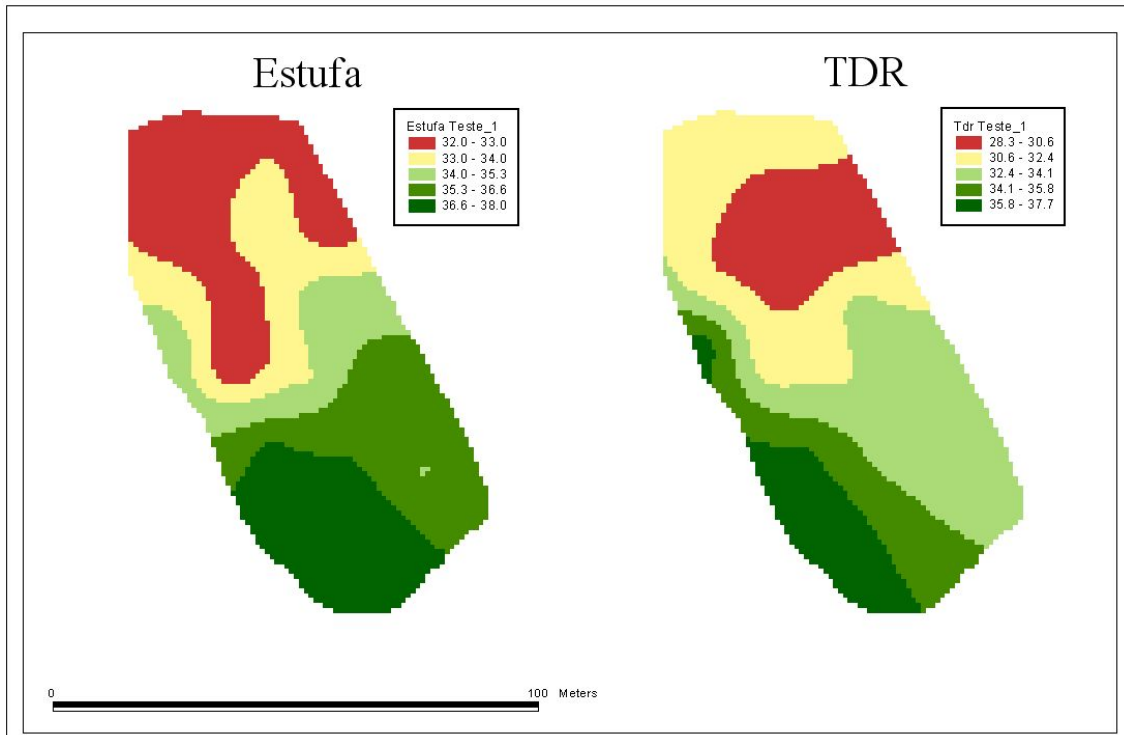


Figura 5. Mapa espacializado da umidade determinada pelo método da estufa e pelo TDR, para o primeiro teste.

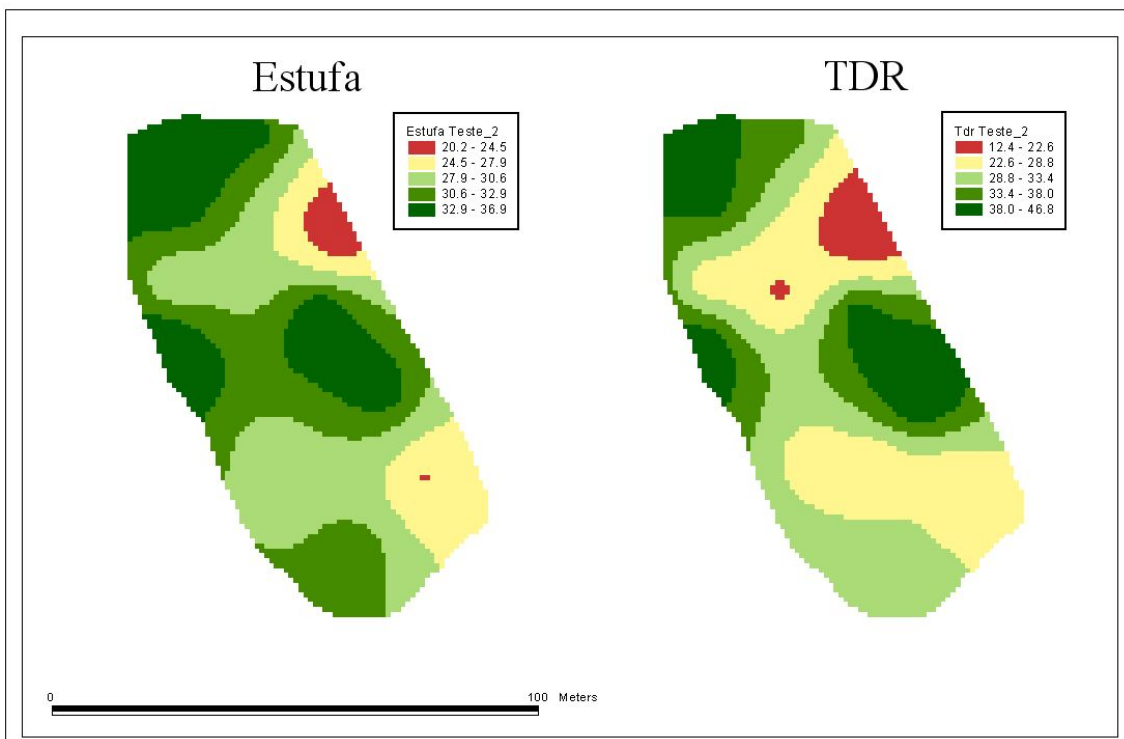


Figura 6. Mapa espacializado da umidade determinada pelo método da estufa e pelo TDR, para o segundo teste.

Tendo-se por base os mapas, através do SIG executou-se um procedimento de determinação do coeficiente de correlação entre os métodos. As Tabelas 3 e 4 apresentam os coeficientes de correlação obtidos respectivamente para o primeiro e para o segundo teste.

Tabela 3. Coeficiente de correlação obtido no primeiro teste, dia 24 de abril de 2004.

Variáveis	Estufa	TDR
Estufa	1.00	0.85
TDR	0.85	1.00

Tabela 4. Coeficiente de correlação obtido no segundo teste, dia 27 de agosto de 2004.

Variáveis	Estufa	TDR
Estufa	1.00	0.88
TDR	0.88	1.00

Por essa análise, verifica-se em ambos os testes, significativa correlação entre os métodos que compõem o estudo.

Um fato relevante trata-se da umidade volumétrica média observada no primeiro teste, a qual foi de $0,34 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, ter sido superior a observada no segundo teste, cujo valor foi de $0,30 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Apesar da diferença não ser tão elevada, uma vez que o sistema de irrigação atuava de forma a manter uma umidade adequada à cultura, atribui-se a essa diferença uma das possíveis causas da variação nos coeficientes obtidos entre os dois testes.

No trabalho de CICHOTA & LIER (2002), afirma-se que a relação entre as leituras do TDR e a determinação via estufa deve melhorar quanto mais ampla a faixa de umidade abrangida pelo teste. Este caracteriza-se como outro dos prováveis motivos condicionantes dos maiores coeficiente de regressão e correlação obtido pelo segundo teste.

Os coeficientes de regressão obtidos nos dois testes realizados, evidenciam a necessidade de execução de um procedimento de calibração do equipamento de TDR utilizado, visando adaptá-lo às condições locais de solo.

CONCLUSÃO

Os coeficientes de regressão entre as determinações de umidade via estufa e via equipamento de TDR, foram de 0,55 e de 0,82, respectivamente para o primeiro e segundo testes.

Já os coeficientes de correlação entre os mapas de superfície dos valores interpolados a partir dos resultados dos dois métodos, foram de 0,85 para o primeiro teste e de 0,88 para o segundo.

Esses resultados permitem concluir que, apesar da satisfatória correlação entre os métodos, os coeficientes de regressão obtidos justificam a execução de um procedimento de calibração do TDR para determinação de umidade em condições locais de solo.

PERSPECTIVAS DE CONTINUIDADE

A partir dos ensaios realizados até o momento, tem-se como perspectivas de continuidade do respectivo trabalho, a caracterização espacializada da textura do solo da área na qual o experimento vem sendo realizado. Espera-se, com isso, obter parâmetros que auxiliem no estudo do comportamento da técnica do TDR, por meio da relação entre as leituras de umidade e as características texturais do solo.

A obtenção de uma equação para ajuste das leituras obtidas pelo TDR tendo-se por base as determinações pelo método da estufa, compreende uma próxima etapa do trabalho.

Assume-se como etapa subsequente, a realização de novos testes em campo visando avaliar a equação de ajuste a ser proposta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CICHOTA, R.; **Avaliação no campo de um TDR segmentado para determinação da umidade do solo**. 2003. 100 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- CICHOTA, R.; LIER, Q.J.V. Calibração no campo de um equipamento de TDR segmentado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. **Anais...Cuiabá: SBCS/UFMT, 2002. 1CD-ROM.**
- DAVIS, J.L.; CHUDOBIAK, W.J. In-situ meter for measuring relative permittivity of soils. **Geological Survey of Canada** (Paper 75-1A), p.75-79, 1975.
- FRIZZONE, J.A; BOTREL, T.A. Ensaio e certificação de sistemas e equipamentos para irrigação. In: MIALHE, J.G. **Máquinas Agrícolas: ensaios e certificação**. Piracicaba, SP: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996.
- OLIVEIRA, V. R. **Manejo da água e performance hidráulica de um sistema de irrigação por gotejamento no distrito de irrigação Jaguaribe – Apodi (DIJA)**. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2000.
- SILVA, E.L. **Determinação automática do teor de água em latossolo roxo distrófico com uso de reflectometria de onda**. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1998, Poços de Calda. **Anais...Poços de Calda: SBEA, 1998.**
- TOMMASELLI, J.T.G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time Domain**

Reflectometry). 1997. 109 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

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