

Comparação dos sistemas TDR e ECHO para medida de umidade, em um solo argiloso e em areia

Marcos Antonio Trintinalha^{1*}, Antônio Carlos Andrade Gonçalves¹, Cássio Antonio Tormena¹, Antonio Carlos Saraiva da Costa¹, Marcos Vinicius Folegatti², Paulo Sérgio Lourenço de Freitas¹ e Roberto Rezende¹

¹Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil.

²Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz", Esalq, Universidade de São Paulo-DER, Piracicaba, São Paulo, Brasil.

RESUMO. A determinação da umidade é importante em estudos de dinâmica de água e íons em solos, sedimentos e áreas contaminadas. Para sua determinação, várias técnicas, destrutivas ou não, podem ser empregadas. Dentre as recentes técnicas desenvolvidas, aquelas que utilizam a constante dielétrica do meio (K_a) são muito promissoras. A técnica de TDR (*Time Domain Reflectometry*) tem sido largamente empregada para a determinação da umidade do solo. Embora produza bons resultados, a determinação apresenta custo elevado. Além do TDR, o sistema ECHO tem sido utilizado para medir a constante dielétrica do solo, ou o potencial elétrico, com menor custo. Esse sistema para ser utilizado precisa ser avaliado quanto ao efeito de variáveis do meio sobre as leituras. Este trabalho teve como objetivo comparar dois equipamentos, TDR e ECHO, quanto à precisão e exatidão na determinação do teor de água de colunas de solo. Além disto, foi avaliada a necessidade de se calibrar um equipamento ECHO, como já foi comprovado para o TDR em Nitossolo Vermelho distroférico (NVd), da região noroeste do estado do Paraná, e em areia. O experimento foi conduzido na unidade de pesquisa em agricultura irrigada da Universidade Estadual de Maringá, o Centro Técnico de Irrigação – CTI. Por meio de técnicas de análise de regressão, foram ajustados modelos de calibração para os dados obtidos nos dois materiais, com os dois equipamentos utilizados. Para os materiais referentes às duas classes granulométricas, solo argiloso e areia, as duas técnicas podem ser usadas com bons resultados, desde que cuidadosa calibração seja efetuada. É importante a realização de mais testes com o equipamento ECHO, uma vez que essa técnica, embora muito promissora, é ainda quase totalmente desconhecida, em solos tropicais.

Palavras-chave: TDR, umidade do solo, ECHO, calibração.

ABSTRACT. Comparison of the TDR and ECHO systems to measure soil moisture, in a clayey soil and in sand. TDR technique has been intensively applied around the world to measure volumetric soil water content. Although its good results, this system is rather expensive. Other systems have been developed to measure soil dielectric constant or electric potential under lower cost conditions. ECHO system has been used on some soil conditions with good results. For tropical soils conditions, there is no investigation about its application. This work was carried out to evaluate TDR and ECHO applications on a tropical soil Typic Paleudalf, which presents 73% of clay, commonly found at the Northeast region of *Paraná*, Brazil, and on a "washed sand" material. Mathematic models were fit, by linear regression analyses, to describe relations between soil volumetric water content and apparent soil dielectric constant (K_a) and between soil volumetric water content and electric potential. Results showed that both equipments can be used to adequately estimate soil water content, since careful calibrations were done before use.

Key words: TDR, soil water content, ECHO, calibration.

Introdução

O objetivo da agricultura irrigada é a obtenção de uma produção economicamente viável, procurando maximizar o retorno do investimento realizado, o que exige um manejo racional dos recursos envolvidos. O manejo do recurso água deve ser feito no sentido de torná-lo disponível para as plantas de forma adequada, buscando o rendimento ótimo da cultura,

do ponto de vista econômico.

A umidade do solo é de grande importância no estudo das suas características físico-hídricas, no estudo de processos no sistema solo-planta-atmosfera e no manejo da água, objetivando a produção vegetal. O seu valor, com base em volume (θ), constitui uma importante informação para tomada de decisões de natureza técnica e econômica no contexto da

agricultura irrigada, pois, com essa determinação, ter-se-á informações necessárias sobre a situação de estresse da planta, que pode decorrer tanto por falta quanto por excesso de água.

A umidade do solo, embora seja um conceito físico simples, apresenta dificuldades na sua determinação, de forma a se obter um valor representativo devido à inerente variabilidade espacial e temporal das características físicas do solo (Gonçalves *et al.*, 1999). Existem várias maneiras de se medir a umidade de um solo, segundo métodos diretos ou indiretos, cada qual apresentando determinada precisão, tempo de resposta e custo do equipamento envolvido.

Os métodos de determinação de umidade do solo podem ser classificados em métodos diretos e indiretos. Como método direto, tem-se o gravimétrico, que pode ser realizado com a utilização de uma estufa ou um forno de microondas. Os métodos diretos são destrutivos, o que impede a repetição da medida da umidade no local. Os métodos indiretos são aqueles por meio dos quais se torna possível determinar a quantidade de água presente no solo utilizando-se medidas de características dos mesmos, relacionadas com a umidade. Esses métodos também apresentam algumas desvantagens, tais como a necessidade da realização de uma curva de calibração, que pode ser influenciada por características do solo e por variações decorrentes do próprio meio ambiente.

Dentre os métodos indiretos, podem ser citados os seguintes: sonda de nêutrons, resistência elétrica, tomografia computadorizada com raio X e raios gama (γ), ressonância magnética, a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e o ECHO. O TDR e o ECHO são técnicas não-destrutivas, que não utilizam radiação, de manuseio fácil, portáteis, dotadas de elevada exatidão, que fazem leituras com as sondas instaladas tanto no sentido horizontal quanto no vertical. Apesar de muito convenientes, o emprego destas nas diferentes condições edáficas dos solos tropicais brasileiros foi pouco estudado, o que motivou a realização do presente estudo.

Como a técnica de TDR, a sonda do ECHO mede a constante dielétrica do solo com o objetivo de mensurar o conteúdo volumétrico de água no solo. Os primeiros trabalhos que avaliaram as alterações na constante dielétrica do solo, em função do conteúdo de água, identificaram uma relação entre essas variáveis. Hipp (1974), Hoekstra e Delaney (1974) e Davis e Annan (1977) verificaram que havia uma forte dependência da constante dielétrica em relação ao conteúdo de água maior que em relação à composição e à densidade do solo. Topp *et al.* (1980), estudando cinco tipos de solo, confirmaram, posteriormente, que 93% das variações da constante dielétrica era devido ao conteúdo de água do solo. Esses estudos ainda sugeriram que fatores como

temperatura, tipo de solo, densidade do solo e conteúdo de sal tinham efeito insignificante. Topp e Davis (1985) obtiveram desvios de até $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ entre os valores de umidade medidos em um mesmo local, entre os valores obtidos com o uso do TDR e com o método gravimétrico. Ao comparar valores obtidos em diferentes locais, o desvio foi de até $0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, evidenciando o efeito da variabilidade do solo sobre a qualidade de informação fornecida pelo TDR. As leituras repetidas em um determinado local foram altamente correlacionadas. As técnicas permitem leituras em períodos de tempo relativamente curtos, fazendo-as em apenas alguns segundos. Desta forma, podemos dizer que o princípio que rege as duas técnicas é o mesmo, diferenciando-se na forma da sonda e no equipamento emissor do pulso.

A estimativa da umidade do solo feita a partir da constante dielétrica, medida com o equipamento de TDR ou com o ECHO, assume maior importância em uma faixa de valores de umidade dentro da qual a planta tem condições de retirar água do solo, para atender à demanda estabelecida pelas condições ambientais.

O conceito originalmente apresentado por Veihmeyer e Hendrickson (1949) sugere que a água disponível no solo para as plantas está entre a capacidade de campo e o ponto de murcha. Para o NVd, a umidade correspondente ao ponto de murcha, ou seja, em um potencial de -1500 kPa , é igual a $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Por outro lado, a capacidade de campo para o mesmo assume valores da ordem de $0,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, conforme testes realizados em campo (Trintinalha, 2000). Assim, a água disponível ou disponibilidade total de água (DTA) nesse solo é da ordem de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o que corresponde a $1,0 \text{ mm}$ de água por centímetro de profundidade de solo ($1,0 \text{ mm cm}^{-1} = 0,1 \text{ m m}^{-1}$). É nessa faixa de valores de umidade do solo que as medidas são de maior importância para os objetivos agrônômicos.

Este trabalho teve como objetivo comparar os equipamentos TDR e o ECHO, na determinação do teor de água de diferentes materiais, em condições controladas de laboratório. Além disto, verificou-se a necessidade de calibração do equipamento ECHO para solos ou materiais diferentes, como já foi confirmado por Tommaselli (1997) e por Trintinalha (2000), em relação ao TDR, analisando a possibilidade do seu uso, já que se trata de um equipamento bem mais acessível, quando comparado com o TDR.

Material e métodos

O experimento foi conduzido na unidade de pesquisa em agricultura irrigada da Universidade Estadual de Maringá, no Centro Técnico de Irrigação – CTI, localizado no município de Maringá, com latitude de $23^{\circ} 25' \text{ S}$ e longitude de $51^{\circ} 57' \text{ W}$. A

altitude média é de 540 m e o clima predominante, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, mesotérmico úmido com chuvas abundantes no verão e inverno seco, com precipitação média anual de 1500 mm. O solo da área é caracterizado como (NVd) - Nitossolo Vermelho distroférico (Embrapa, 1999), A moderado, textura muito argilosa (73% de argila). O relevo é suavemente ondulado, com declividade média de 8%.

O funcionamento do equipamento ECHO foi avaliado com o solo da área citada e com areia de construção lavada. Em cada material foram instaladas duas sondas de 20cm de comprimento e duas sondas para leitura com equipamento ECHO, nas quais a umidade foi medida periodicamente, durante um processo de secagem.

Para a realização do trabalho, foram utilizados os aparelhos TRASE 6050X1 da SoilMoisture e ECH₂O da empresa Campbell. Tomou-se, inicialmente, um vaso plástico com capacidade de aproximadamente 8000cm³, o qual foi preenchido com os materiais oriundos do NVd proveniente da camada de 0m a 0,20m de profundidade na primeira etapa e na segunda etapa com a areia. Uma massa de aproximadamente 8,5kg de cada material foi acondicionada de forma homogênea dentro do recipiente. Uma amostra do material foi colocada em uma estufa a 105°C, para que a massa de solo seca ao ar fosse corrigida para solo seco em estufa.

As sondas foram instaladas verticalmente na terra fina seca ao ar obtida a partir do NVd. Para que não houvesse erros decorrentes de instalação, instalou-se a sonda ECHO 1 e fez-se a leitura com a mesma, em seguida, a sonda TDR 1 e fez-se a leitura com as duas, da sonda ECHO 2 fez a leitura das três e, por último, a sonda TDR 2 e foi realizada a leitura de todas as sondas. Como a precisão dos equipamentos é elevada, o que se traduz em uma habilidade destes de repetirem a mesma leitura enquanto a umidade do meio permanece constante, qualquer interferência que pudesse ocorrer em função da proximidade das sondas poderia ser detectada. Observou-se que essa interferência não ocorreu.

Em seguida, foi feita a saturação dos materiais, por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja. Após 48 h dentro de um recipiente maior, com água até 2/3 da altura do vaso, o mesmo foi retirado e colocado sobre uma bancada, deixando-se que o excesso de água drenasse. Para a determinação da umidade gravimétrica presente a cada instante no recipiente, pesava-se o mesmo com solo e as sondas. Após, diminuía-se da massa encontrada o valor referente às sondas, ao recipiente e à massa do solo seco, ficando apenas a massa da água presente na amostra. Esta, por sua vez, quando dividida pela massa de solo seco, colocada dentro do recipiente, no início do processo, fornecia o valor da umidade com base em massa que, multiplicada pela

densidade do material presente no recipiente, fornecia o valor da umidade com base em volume. Esse processo teve início após a drenagem do excesso, e nesse momento eram realizadas as leituras dos dois equipamentos (ECHO e TDR). Esse procedimento foi repetido em média duas vezes por dia, durante o processo de secagem do material.

Foram obtidas as leituras de constante dielétrica aparente do meio (K_a) e umidade estimada com base em volume (θ), com as duas sondas de TDR e, para cada sonda do ECHO, foram obtidas medidas de potencial elétrico, expresso em milivolts, e a estimativa da umidade com base em volume (Pct). Com uma balança de precisão (0,01g), determinou-se a cada leitura a massa total do conjunto. Levando-se em conta a massa do recipiente, das sondas e a massa de material seco presente no recipiente, determinou-se a umidade do material. O processo foi repetido até que uma ampla faixa de valores de umidade, desde próximo da saturação até umidades menores do que aquela correspondente ao limite inferior teórico de água disponível no solo.

Ao término das medidas, as sondas foram removidas e a umidade foi novamente determinada pelo método gravimétrico, o que permitiu confirmar a qualidade das avaliações de umidade realizadas durante o ensaio. A partir do valor de massa de material seco presente no recipiente, calculou-se a densidade dos materiais, utilizando para tanto o valor de volume do recipiente.

Na segunda etapa do processo, os equipamentos ECHO e TDR foram utilizados para realizar medidas utilizando material composto por quartzo a partir do uso de areia lavada, peneirada em peneira de 2,0 mm e seca ao ar. Esse procedimento teve como objetivo realizar as avaliações sob condições de ausência de compostos mineralógicos ricos em ferro, os quais podem influenciar as medidas realizadas pelos equipamentos. O procedimento foi repetido como descrito para o material oriundo do NVd. Por questões operacionais ligadas à disponibilidade do equipamento ECHO, ou seja, a necessidade de se devolver a unidade de leitura e as sondas cedidas, à empresa representante do fabricante no Brasil, a faixa de umidade em que se realizou as medidas foi mais estreita do que para o NVd.

Os valores de umidade com base em volume, os valores de constante dielétrica (K_a) obtidos com o TDR e os valores de potencial elétrico medidos com o ECHO, permitiram o ajuste, por meio de análise de regressão, de modelos para umidade e K_a e umidade e potencial elétrico.

Resultados e discussão

Na primeira etapa do trabalho, realizada com Nitossolo Vermelho distroférico (NVd), os valores de potencial elétrico, expressos em milivolts,

fornechos pelo equipamento ECHO e os respectivos valores de umidade do solo com base em volume, são apresentados na Figura 1. Os valores de potencial elétrico são as médias dos valores obtidos por duas sondas de cada equipamento, a partir das quais calculou-se o valor médio de potencial elétrico, conforme apresentado.

Verifica-se, pela Figura 1, que as duas sondas do ECHO, para cada valor de umidade, apresentaram valores muito semelhantes de potencial elétrico, principalmente para faixa intermediária de umidade, notadamente entre CC e PMP, onde as leituras praticamente se superpõem. Para o solo com baixa umidade, aquém do ponto de murcha, a dispersão entre os valores referentes às duas sondas é maior. No entanto, essa é uma região de pouco interesse agrônômico.

A partir dos valores de umidade volumétrica e potencial elétrico foi possível o ajuste de um modelo quadrático de regressão. A equação que define a curva de calibração do equipamento é:

$$\theta = 4,002132 - 1,078809 x + 7,753852 \times 10^{-6} x^2$$

($r^2 = 0,98$)

em que

θ é a umidade do solo em $m^3 m^{-3}$ e x é o potencial elétrico em mV.

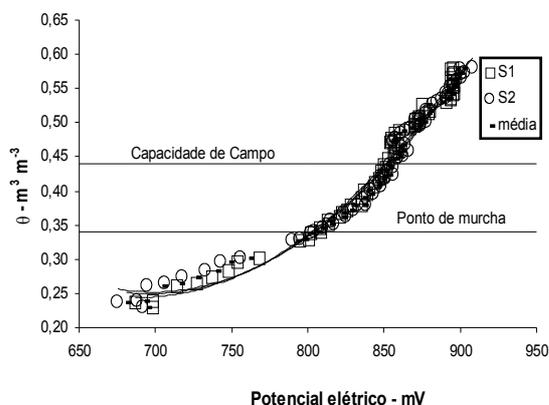


Figura 1. Medida do potencial elétrico de duas sondas ECHO e correspondente conteúdo volumétrico de água, medido no NVd. S1 e S2, representam as sondas ECHO.

A Figura 1 revela a homogeneidade de leituras efetuadas pelas sondas, uma vez que esse modelo se sobrepõe aos dois modelos ajustados para as duas sondas isoladamente. Os resultados demonstram que o equipamento ECHO pode ser usado para avaliar a umidade do Nitossolo Vermelho distroférrico (NVd) com elevada precisão, desde que seja feita a sua calibração prévia.

Os valores de constante dielétrica (K_a) medidos com duas sondas de TDR (construídas com o mesmo material, com o mesmo diâmetro das hastes, e apresentando o mesmo comprimento) e os valores

medidos de umidade com base em volume são apresentados na Figura 2. Verifica-se que as duas sondas apresentam curvas de calibração distintas, para valores de umidade acima do ponto de murcha permanente, resultado estes obtidos também por Trintinalha *et al.*, (2001). O afastamento entre elas é crescente para valores de umidade acima do PMP, apenas coalescendo para o valor máximo de umidade, quando o solo está praticamente saturado, no início do processo de secagem do mesmo.

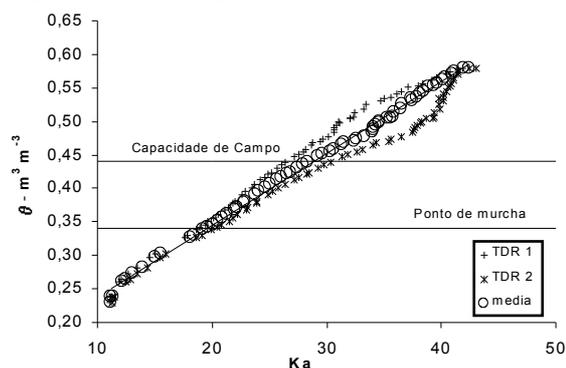


Figura 2. Valores da constante dielétrica (K_a), medido por duas sondas de TDR e correspondente conteúdo volumétrico de água, medido no NVd.

Para valores de umidade abaixo do PMP, as curvas também coalescem (Trintinalha *et al.*, 2001). A relação entre os valores médios de K_a e a umidade com base em volume pode ser descrita por um modelo linear ajustado, conforme apresentado:

$$\theta = 0,1305 + 0,0107 K_a \quad r^2 = 0,997$$

em que

θ - umidade do solo, $m^3 m^{-3}$

K_a - Constante dielétrica.

Embora o modelo polinomial de terceiro grau proposto por Topp *et al.* (1980) seja tradicionalmente empregado para converter valores medidos de constante dielétrica (K_a) em umidade do solo, para o solo em questão o modelo linear ajustado revelou-se mais adequado, evidenciando a importância da calibração prévia do equipamento para os diversos solos tropicais. O uso do TDR permite, segundo esses valores médios, a realização de estimativas adequadas da umidade do solo, desde que uma curva de calibração prévia seja utilizada.

Os resultados obtidos permitiram verificar que ambos os equipamentos podem dar origem a adequadas estimativas de umidade do solo, desde que sejam previamente calibrados para o solo em questão. O TDR, no entanto, mostrou-se sujeito à ação de outros fatores, tais como a densidade do material e as características do contato solo-sonda, além da umidade do solo, nas suas leituras, conforme discutido em Trintinalha *et al.* (2000). Outros autores têm demonstrado a necessidade de calibrações prévias

do equipamento, quando utilizado para fazer medidas diretas da umidade do solo (Tommaselli, 1997).

Na Figura 3, são apresentados, no eixo das ordenadas, os valores de umidade do solo com base em volume, avaliados experimentalmente (valores medidos a partir das leituras de massa do conjunto e da densidade do solo) e os valores médios estimados com os equipamentos de TDR e ECHO, bem como os valores estimados com o uso dos modelos ajustados às relações entre K_a e θ (TDR) e entre potencial elétrico e θ (ECHO).

Os resultados obtidos com o equipamento ECHO apresentaram valores subestimados ao longo de toda a faixa de umidade correspondente ao estudo realizado. Quanto mais úmido o solo, maior a variação apresentada pela técnica, ou seja, maior o desvio entre o valor de umidade medido e o estimado pelo equipamento. A sensibilidade da leitura do aparelho às variações de umidade do solo é elevada e a dispersão entre os valores medidos de potencial elétrico, para uma certa umidade é baixa. Isto pode caracterizar uma elevada precisão do aparelho, a qual se traduz pela sua capacidade de descrever a variação da umidade do solo em questão. Como pode ser observado na Figura 3, o modelo ajustado fez os valores estimados de umidade tornarem-se muito próximos dos valores medidos, em toda a faixa de umidade (pontos sempre próximos à reta 1:1 na Figura 3), confirmando que a técnica é de excelente qualidade para o solo estudado nos intervalos de θ adotado, apenas requer uma calibração prévia do equipamento para o uso.

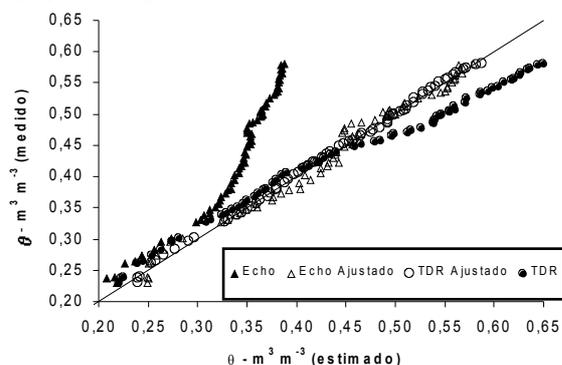


Figura 3. Conteúdo volumétrico de água medido e valores estimados pelo TDR e ECHO, com e sem o uso de modelos de calibração, no NVd.

Os valores de umidade obtidos com a técnica TDR, utilizando o modelo de calibração do equipamento para obter umidade a partir dos valores médios de K_a , ficaram mais próximos da reta 1:1 quando comparados com o ECHO. Isto significa que, para esse solo, a estimativa direta da umidade do solo em um dado momento, em média, teria um menor erro com o uso do TDR.

Quando os valores de umidade são estimados

segundo um modelo ajustado aos dados medidos, tanto o TDR quanto o ECHO se mostram capazes de descrever com exatidão os valores de umidade do solo, em toda a faixa de umidade estudada. Como pode ser constatado na Figura 3, os valores obtidos a partir do modelo de calibração para ambos equipamentos situam-se próximos a reta 1:1. Nesse caso, o TDR apresenta uma dispersão ligeiramente menor que a apresentada pelo ECHO, embora as diferenças entre as estimativas, para fins práticos, podem ser ignoradas, particularmente quando o objetivo é o manejo de água na agricultura irrigada.

Para a segunda etapa do trabalho que foi realizado com areia, os valores de umidade apresentaram uma variação dentro de uma faixa estreita de valores, evidenciando a necessidade de avançar a fase de secagem do solo. Na Figura 4, pode-se verificar que, partindo de uma condição próxima da saturação, a umidade da areia variou entre $0,66\text{m}^3\text{m}^{-3}$ e $0,54\text{m}^3\text{m}^{-3}$. Essa pequena variação está relacionada com a baixa condutividade hidráulica da camada superior do material quando seca, a qual apresentou-se seca após algumas horas do início do processo de secagem. Com uma taxa de evaporação baixa, a umidade do material permaneceu elevada dentro do recipiente, durante o curto período no qual as avaliações foram realizadas.

Na Figura 4, são apresentados os valores medidos de potencial elétrico, usando as duas sondas do ECHO, o valor médio encontrado, e o valor medido da umidade do material com base em volume.

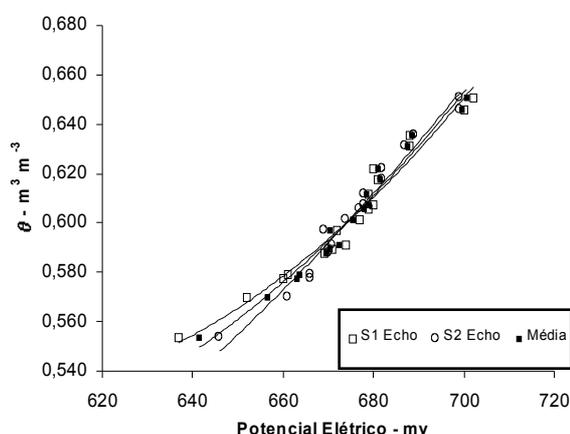


Figura 4. Valores de Potencial Elétrico medido com duas sondas do Echo e correspondente conteúdo volumétrico de água, medido na areia.

Observa-se, na Figura 4, que as duas sondas do ECHO instaladas na areia apresentaram, praticamente, a mesma relação entre potencial elétrico e umidade do material, com base em volume, medida a partir de leituras de massa do sistema e sua densidade. Como observado para o Nitossolo Vermelho distroférrico, as sondas permitiram medidas homogêneas de potencial elétrico e umidade. Assim

como verificado para o solo argiloso, a secagem do material mostra uma pequena tendência de afastamento das duas curvas. Para uma melhor análise do equipamento, seria muito importante monitorar a umidade em um solo arenoso, dentro de uma faixa mais ampla que o intervalo entre o ponto de murcha e a capacidade de campo, como feito para o solo argiloso.

A curva de calibração obtida para este material pode ser descrita por um polinômio de segundo grau, conforme segue:

$$\theta = 3,19738 - 9,5317 \cdot 10^{-3} x + 8,4242 \cdot 10^{-6} x^2 \quad r^2 = 0,97$$

em que

θ - umidade do solo, $m^3 m^{-3}$

x - potencial elétrico, mV.

Observa-se que, assim como para o NVd, o equipamento ECHO pode ser utilizado para avaliar a umidade com base em volume da areia com elevada precisão, desde que seja feita a sua calibração prévia.

Na Figura 5, encontram-se os valores de K_a obtidos com leituras realizadas com duas sondas de TDR, a média dessas leituras e correspondentes valores de umidade do solo. Pode-se verificar que as leituras realizadas pelas duas sondas apresentaram curvas próximas para alta umidade na areia, afastando-se uma da outra, à medida que o material seca.

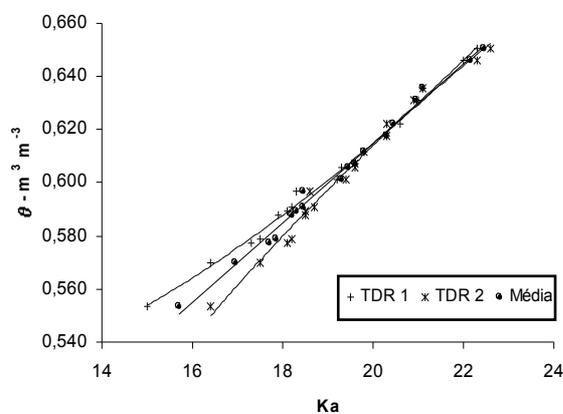


Figura 5. Valores da Constante Dielétrica (K_a) medidos por duas sondas de TDR e correspondente conteúdo volumétrico de água, medido na areia.

Provavelmente nesse material ocorre fenômeno semelhante ao ocorrido no solo argiloso, ou seja, para valores intermediários de umidade as duas curvas, referentes às duas sondas, se distanciam, aproximando-se nos extremos. Como o monitoramento foi feito na parte mais úmida do processo, esta etapa do trabalho é visualizada na Figura 5.

A relação entre os valores médios de K_a e a umidade com base em volume pode ser descrita por

um modelo linear ajustado, conforme segue:

$$\theta = 0,3162 + 0,0149 K_a \quad r^2 = 0,99$$

em que

θ - umidade do solo, $m^3 m^{-3}$

K_a - Constante dielétrica

Como já relatado acima, o uso do TDR permite, segundo estes valores médios, fazer adequadas estimativas da umidade do solo, com a utilização de uma curva de calibração ajustada.

Na Figura 6, são apresentados os valores de umidade do material com base em volume, medidos com os equipamentos de TDR e ECHO na areia. Estes valores foram plotados no gráfico junto com o correspondente valor medido da umidade do material.

Os valores de umidade obtidos com o ECHO, na areia, apresentaram-se menores que os valores medidos, em toda a faixa de valores de umidade considerada. Na Figura 6, pode-se verificar a grande diferença entre estes valores. No entanto, assim como no Nitossolo Vermelho distroférrico, o ajuste de um modelo permitiu a transformação dos valores medidos de potencial elétrico em valores de umidade que correspondem aos valores medidos. Pode-se observar, na Figura 6, que os dados referentes ao modelo estão sobre a reta 1:1. Isto vem confirmar mais uma vez que a técnica requer uma calibração prévia do equipamento para a sua utilização e que esta calibração é possível, para toda a faixa de umidade estudada. Torna-se, desta forma, importante avaliar o funcionamento do equipamento em outros solos, com variação de umidade que envolva toda a faixa de interesse agrônomo.

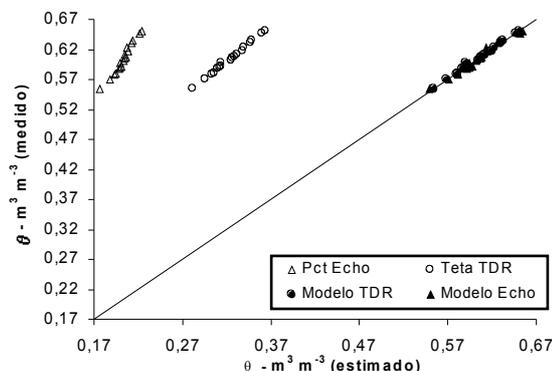


Figura 6. Valores do conteúdo volumétrico de água na areia versus valores estimados pelo TDR e ECHO, com e sem o uso do modelo de calibração, para a areia.

Os resultados obtidos com a técnica TDR apresentaram, como no ECHO, valores subestimados de umidade durante a leitura, porém, apresentaram uma maior proximidade da reta 1:1. Novamente, constata-se que o ajuste de um modelo de calibração foi possível, dando origem a estimativas adequadas da umidade do material, conforme pode ser observado na Figura 6.

Os resultados obtidos, utilizando os dois sistemas, nos dois materiais, evidenciam a necessidade de calibração de ambos, para que a estimativa da umidade seja adequada, bem como a necessidade da calibração para cada solo, uma vez que o comportamento dos equipamentos é distinto entre os materiais utilizados.

Os resultados mostram que os ensaios devem ser realizados com diferentes solos, em diferentes classes granulométricas, obtendo-se a curva de calibração para cada um. Destaca-se também o fato de que as duas técnicas podem ser empregadas com bastante sucesso na medida da umidade, após a calibração. A grande diferença de custo do equipamento faz com que o ECHO se torne em muito conveniente, uma vez que, com a calibração, pode dar origem a resultados tão bons quanto o TDR, com um custo fixo muito menor. O TDR, por outro lado, ao permitir a automatização e a realização de várias leituras em série, apresenta-se conveniente para a utilização em condições onde um grande número de leituras é requerido como, por exemplo, em trabalhos de pesquisa.

Conclusão

Para os materiais referentes às duas classes granulométricas extremas, solo argiloso e areia, as duas técnicas podem ser usadas com bons resultados, desde que cuidadosa calibração seja efetuada. As duas técnicas apresentaram comportamento distinto em ambos materiais. Assim, a calibração precisa ser feita para cada uma e para cada material no qual será utilizada. Embora seja relativamente aceita a informação de que um único modelo de estimativa de umidade pode ser usado em diferentes condições, este procedimento pode levar a erros grosseiros, tanto na utilização do TDR quanto na do ECHO. Por ser um equipamento de custo fixo muito inferior ao do TDR, o ECHO torna-se uma opção muito conveniente de uso, particularmente quando a automatização não é importante, uma vez que, devidamente calibrado, pode produzir resultados tão bons quanto os do TDR. É muito importante a realização de mais testes com o equipamento ECHO, uma vez que esta técnica, embora muito promissora, é ainda quase totalmente desconhecida, particularmente para emprego em solos

tropicais.

Referências

- DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic detection of soil moisture. Progress Report, 1. *Can. J. Remote Sensing*, Ottawa, v.3, n.1, p.76-86, 1977.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília: EMBRAPA-SPI; Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ, 1999. 412p., il. mapas policr. (Co-autoria: Itamar Antonio Bognola, Embrapa-NMA).
- GONÇALVES, A.C.A. *et al.* Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa, v.23, p. 155-164, 1999.
- HIPP, J.E. Soil electromagnetic parameters as a function of frequency, soil density and soil moisture. *Proc. IEEE*, New York, v.62, p.98-103, 1974.
- HOEKSTRA, P.; DELANEY, A. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *J. Geophys. Res.*, Washington, DC., v.79, p.1699-1708, 1974.
- TOMMASELLI, J.T.G. *Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time-Domain Reflectometry)*. Piracicaba, 1997. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L. Measurement of soil water content using Time-domain Reflectometry (TDR): A Field Evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.49, p.19-24, 1985.
- TOPP, G. C. *et al.* Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour.s Res.*, Canada, v. 16, p.574-582, 1980.
- TRINTINALHA, M. A. *Avaliação da técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR) na determinação de umidade em NITOSSOLO VERMELHO Eutroférico*. 2000. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2000.
- TRINTINALHA, M.A. *et al.* Efeito da instalação e da variabilidade entre sondas no uso da técnica de TDR em um Nitossolo Vermelho Distroférico. *Acta Scientiarum*, Maringá, v.23, n.5, p.1165-1171, 2001.
- VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. *Soil Sci.*, Madison, v.68, p.75-94, 1949.

Received on July 01, 2002.

Accepted on August 29, 2002.