

EFEITO DA SALINIDADE DO SOLO NAS LEITURAS DE UMIDADE REALIZADAS COM SENSOR CAPACITIVO

BARROCA, M.V.¹; JERSZURKI, D.²; LAZAROVITCH, N.³; SOUZA, J.L.M.⁴;
OLIVEIRA, S.R.¹

¹Pós-Graduação em Ciência do Solo, UFPR; ²Pesquisadora, Ben-Gurion University of the Negev, Jacob Blaustein Institutes for Desert Research; ³Professor do Departamento de Agricultura e Biotecnologia para regiões áridas, Ben-Gurion University, Israel; ⁴Professor do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, UFPR, e-mail: jmoretti@ufpr.br

RESUMO

Sensores dielétricos tem sido largamente utilizados para monitorar a umidade do solo, devido a praticidade e possibilidade de automação. Porém, trabalhos indicam que as medidas do conteúdo de água por esses aparelhos são sensíveis à salinidade do meio. Teve-se por objetivo no presente trabalho analisar o efeito da condutividade elétrica (EC) do solo nas medições do conteúdo de água com sensor capacitivo GS3, em solo arenoso. O experimento foi conduzido em vasos mantidos em ambiente protegido, na Universidade de Ben-Gurion, em Israel. Os tratamentos consistiram em quatro soluções salinas de condutividade elétrica (EC_w), sendo de sais analisados (0,31 dS m⁻¹, 2,5 dS m⁻¹, 4,35 dS m⁻¹ e 8,75 dS m⁻¹), em quatro umidades volumétricas (θ) de água no solo (0,11 m³ m⁻³, 0,16 m³ m⁻³, 0,24 m³ m⁻³ e 0,32 m³ m⁻³). O valor $\theta = 0,32$ m³ m⁻³ corresponde ao solo saturado. Os valores de umidade medidos pelo sensor foram comparados com os valores obtidos em laboratório com o método gravimétrico, e curvas de calibração foram ajustadas para cada solução salina. O efeito das crescentes condutividades elétricas (EC) nas leituras de umidade do solo com o sensor não seguiu tendência linear crescente nem decrescente, sendo os maiores valores de umidade observados nas soluções de EC_w 0,31 dS m⁻¹ e 8,75 dS m⁻¹. As alterações na salinidade das soluções não apresentaram efeitos significativos na calibração do sensor. A calibração fornecida pelo manual do GS3 obteve erro superior às calibrações ajustadas, indicando a necessidade de calibração prévia.

Palavras-chave: Condutividade dielétrica; salinidade; calibração; conteúdo volumétrico de água.

INTRODUÇÃO

O monitoramento da umidade do solo é importante no manejo da agricultura irrigada e em vários estudos agronômicos e ambientais. Valores precisos do conteúdo de água no solo são necessários para avaliação dos ciclos do N e C, na dinâmica de água no solo e no ciclo hidrológico em diversos ambientes (Quemada et al., 2010). A quantificação da umidade do solo pode ser feita diretamente retirando-se amostras de solo e levando ao laboratório para secagem e pesagem, ou indiretamente utilizando sensores de umidade. O sensor tem sido largamente utilizado por ser um método não destrutivo, exigir menor mão de obra, fornecer leituras instantâneas de umidade do solo e possibilitar a automação.

Os aparelhos mais utilizados atualmente determinam o conteúdo de água no solo a partir da avaliação da constante dielétrica (K_a) do meio, como os sensores de Reflectometria no domínio da frequência (FDR), tempo (TDR) e amplitude (ADR) (Souza et al., 2013; Silva, 2013; Fares e Polyakov, 2006). Os FDRs, também chamados sensores capacitivos, emitem campo magnético com frequência específica, que se estende ao conjunto solo-ar-solução. Em seguida, medem a oscilação da frequência emitida a partir da K_a que posteriormente é convertida em conteúdo volumétrico de água (θ_v) por uma equação de calibração (Quemada et al., 2010; Decagon Devices, 2016). Topp et al. (1980) consideram que a K_a do solo é altamente sensível ao conteúdo de água e pouco sensível ao tipo de solo e densidade, demonstrando ser ótima variável para a estimativa de umidade do solo.

No entanto, vários trabalhos relatam superestimativa da umidade do solo quando o sensor de umidade é submetido nos solos com alta concentração de sais (Sun et al., 2000; Inoue et al., 2008; Regalado et al., 2007; Topp et al., 2000). Existem várias explicações para a ocorrência do erro em solos salinos. Os sais podem causar dispersão do sinal emitido pelo sensor, ou até mesmo elevar a constante dielétrica do meio, reduzindo a velocidade de propagação do campo eletromagnético, com consequente aumento na leitura do sensor (Topp et al. 2000; Sun et al., 2000). Inoue et al. (2008), avaliando a eficácia de 12 sensores dielétricos (TDRs, FDRs e ADRs) na quantificação da umidade em solos salinos, observou que o sensor de capacitância (FDR) teve maior sensibilidade a salinidade em comparação aos TDRs. No entanto, Silva (2013) trabalhando com soluções salinas de até 9 dS m⁻¹ não observou influencia no erro relativo da umidade do solo nos diferentes níveis salinos.

Diante das considerações dispostas, verifica-se que existe pouca informação sobre o efeito da salinidade nos sensores capacitivos, havendo ainda algumas contradições na literatura. A grande maioria dos trabalhos avaliaram o atraso do sinal em aparelhos de reflectometria no domínio do tempo (TDR) e não da frequência (FDR). Desta forma, teve-se por objetivo no presente trabalho analisar o efeito da condutividade elétrica (EC) do solo nas medições do conteúdo de água com sensor capacitivo, em solo arenoso.

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em potes dentro de estufa de ventilação natural do *Jacob Blaustein Institutes*, no Departamento de Agricultura e Biotecnologia para regiões áridas da

Universidade de Ben-Gurion, em Israel. O solo utilizado no estudo foi coletado em casa de vegetação com produção de tomate cereja (*Lycopersicon esculentum*), fertirrigados por sistema de gotejo, localizada ao sul de Israel, na região do deserto do Neguev. Após a coleta, o solo foi peneirado em malha de 2 mm. A verificação da salinidade inicial foi realizada com o procedimento de extração por relação solo:água 1:1 (EC 1:1), obtendo valor médio de condutividade elétrica igual a 1,85 dS m⁻¹. Para reduzir a salinidade inicial, para não afetar os tratamentos, foi realizada a lavagem do solo utilizando água dessalinizada (EC 0,07 dS m⁻¹) em peneira de 106 micrometros. O solo foi lavado até que a solução proveniente da peneira alcançasse valor entre 0,1 e 0,3 dS m⁻¹. Posteriormente o solo foi seco ao ar e analisado quanto as propriedades físicas (Tabela 1).

Tabela 1. Textura, massa específica das partículas (ρ_p) e condutividade elétrica do solo (EC), após peneirado e lavado.

----- Areia (%)-----		Silte	Argila	ρ_p	EC 1:1
Grossa	Fina	(%)	(%)	(kg m ⁻³)	(dS m ⁻¹)
62	33	3,5	1,5	2710	0,424

Após secagem e homogeneização o solo foi pesado e umedecido de acordo com cada tratamento. Os tratamentos consistiram em quatro soluções salinas, resultante da mistura de sais fertilizantes, tendo condutividade elétrica (ECw) igual a 0,31 dS m⁻¹, 2,5 dS m⁻¹, 4,35 dS m⁻¹ e 8,75 dS m⁻¹ de sais analisados, em quatro umidades volumétricas de água no solo: 0,11 m³ m⁻³, 0,16 m³ m⁻³, 0,24 m³ m⁻³ e 0,32 m³ m⁻³ (solo saturado). Os tratamentos foram dispostos em parcelas subdivididas com quatro repetições, resultando em 64 unidades experimentais (4 soluções . 4 umidades . 4 repetições). Os valores de cada tratamento foram selecionados com o objetivo de simular e extrapolar as condições vistas no campo.

Os quatro níveis de água foram obtidos individualmente, espalhando-se a amostra de solo seco em um recipiente largo, sendo adicionada vagarosamente a solução desejada. A amostra foi revolvida manualmente durante e após a aplicação da solução. Após homogeneização, o solo úmido foi novamente pesado e acondicionado em potes com volume máximo de 2,5 litros, cuidadosamente manuseados para manter sempre o mesmo volume de solo em todos eles (1910 cm³), a fim de obter massa específica do solo igual a 1,4 g cm⁻³. Após acondicionado nos vasos, o solo foi coberto com papel alumínio e incubado por pelo menos 6:00 h antes das medições de umidade com o sensor.

O sensor FDR utilizado foi o GS3, produzido pela Decagon Devices, sendo capaz de medir simultaneamente a umidade volumétrica de água no solo (θ), temperatura (°C) e condutividade elétrica (EC). O GS3 possui três hastes de aço de 5,5 cm de comprimento, e utiliza frequência de 70 MHz para medir a constante dielétrica (K_a) do solo, que posteriormente é convertida em umidade volumétrica de água no solo (θ) pela equação modificada de Topp et al. (1980):

$$\theta = 5,89 \cdot 10^{-6} \cdot K_a^3 - 7,62 \cdot 10^{-4} \cdot K_a^2 + 3,67 \cdot 10^{-2} \cdot K_a - 7,53 \cdot 10^{-2}$$

Sendo: θ – umidade volumétrica de água do solo (m³.m⁻³); K_a – constante dielétrica (adimensional).

Foi utilizado apenas um sensor GS3 conectado ao datalogger EM 50, limpando os eletrodos após cada medição. O sensor foi instalado na profundidade de 5 cm, distante 6 cm da parede dos potes, permanecendo em cada vaso o tempo necessário até que os valores de umidade permanecessem estáveis.

Os valores de umidade medidos no sensor foram comparados com os valores obtidos com o método gravimétrico. As análises com o método gravimétrico foram realizadas após as medições com GS3, retirando-se amostras indeformadas do solo de cada pote. As amostras foram secas em estufa de ventilação forçada a 105 °C, por um período de 30 h (até atingir peso constante) e pesadas antes e após secagem. Com as mesmas amostras, foi verificado a massa específica do solo em cada unidade experimental, obtendo sempre valores entre 1,4 e 1,5 g cm⁻³ de solo.

Os dados obtidos com o sensor foram comparadas com o método padrão (gravimétrico), utilizando diagrama de dispersão e coeficiente de correlação. Foram ajustadas equações de calibração e realizado teste de *t* com 5 % de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de umidade volumétrica quantificados com o sensor superestimaram a umidade do solo em todas as salinidades, com exceção das umidades 0,090 e 0,088 m³.m⁻³ nas soluções de 2,5 dS m⁻¹ e 4,35 dS m⁻¹ de sais, respectivamente (Tabela 2). De modo geral, a precisão da calibração do sensor obteve desvio da raiz quadrada média (RQM) de 0,05 m³ m⁻³, considerada aceitável à fraca por Fares et al. (2011). A fraca precisão da calibração padrão do GS3 pode ter sido consequência dos tratamentos salinos.

Tabela 2. Média das umidades volumétricas (m³.m⁻³) medidas pelo sensor GS3 sob crescente umidade e salinidade.

$\theta_{\text{gravimétrica}}$ (m ³ m ⁻³)	----- Condutividade elétrica da solução (dS m ⁻¹) -----			
	0,31	2,5	4,35	8,75
0,11	0,156	0,090	0,088	0,120
0,16	0,174	0,163	0,161	0,193
0,24	0,307	0,301	0,304	0,308
0,32	0,397	0,355	0,341	0,400

Analisando as leituras de umidade com o sensor GS3 nas crescentes salinidades é possível observar a variação dos valores devido a condutividade elétrica da solução (Ecw) (Tabela 2). A variação nos valores de umidade também foi observada por Sun et al. (2000) e Inoue et al. (2008), que trabalhando com diferentes sensores dielétricos, observaram que o aumento da concentração de sais no solo resultou em superestimação da umidade. Entretanto, o efeito das crescentes salinidade no presente trabalho não seguiu tendência clara de aumento ou decréscimo nas leituras de umidade, sendo os menores valores de umidade volumétrica obtidos nos tratamentos com ECw mediana, e os maiores valores nos tratamentos extremos com menor (0,31 dS m⁻¹) e maior (8,75 dS m⁻¹) salinidade. Os maiores erros foram obtidos

no solo saturado ($0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de água) com as soluções de $0,31$ e $8,75 \text{ dS m}^{-1}$, com erros de $0,77$ e $0,80 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ respectivamente.

As relações entre o volume de água no solo estimado com o sensor GS3 e o obtido com o método padrão (gravimétrico), em cada salinidade, encontram-se apresentadas na Figura 1. Em todos os tratamentos observou-se alta correlação ($r^2 > 0,93$) entre os valores de umidade gerados pelo sensor e o método padrão. Os dados indicam maior afastamento das retas ao eixo 1:1 com aumento do conteúdo de água no solo, ou seja, a superestimação dos valores de umidade foi agravada em condições próximas à saturação. Devido a diferença dos valores de umidade entre as salinidades observadas na Figura 1 e valores da Tabela 2, foram realizadas curvas de calibração para cada solução com os valores de K_a do sensor (Tabela 3).

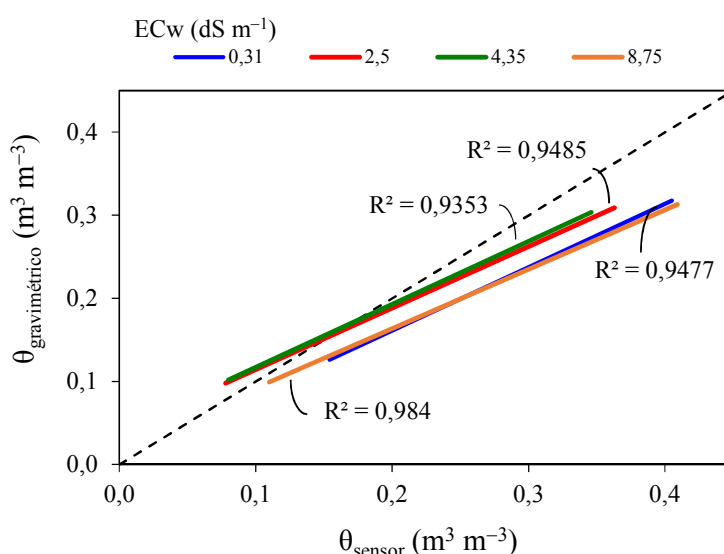


Figura 1 – Análises de regressão linear entre a umidade volumétrica de água no solo (θ) obtido com o método gravimétrico ($\theta_{\text{gravimétrico}}$) e sensor capacitivo (θ_{sensor}), em cada salinidade.

Tabela 3. Equações de calibração e estatísticas de cada solução salina, comparadas com a equação fornecida no manual do GS3.

Calibrações	Equação de calibração	r^2 ⁽¹⁾	RQM ⁽²⁾	n ⁽³⁾
Manual	$\theta = 5,89 \cdot 10^{-6} K_a^3 - 7,62 \cdot 10^{-4} \cdot K_a^2 + 3,67 \cdot 10^{-2} K_a - 7,53 \cdot 10^{-2}$	0,9211	0,050 a *	63
$0,31 \text{ dS m}^{-1}$	$\theta = 0,0150 K_a + 0,0210$	0,9518	0,028 b	47
$2,50 \text{ dS m}^{-1}$	$\theta = 0,0168 K_a + 0,0268$	0,9669	0,029 b	47
$4,35 \text{ dS m}^{-1}$	$\theta = 0,0175 K_a + 0,0253$	0,9527	0,035 b	47
$8,75 \text{ dS m}^{-1}$	$\theta = 0,0144 K_a + 0,0263$	0,9865	0,031 b	47

⁽¹⁾Coefficiente de determinação (r^2); ⁽²⁾Desvio da raiz quadrada média (RQM); ⁽³⁾Número de amostras avaliadas (n); *, *Diferença estatística pelo teste de t a 5% de probabilidade.

As calibrações realizadas com as soluções resultaram em maior precisão das umidades volumétricas do solo (θ) em relação à calibração sugerida no manual. Além disso, a equação sugerida no manual é do terceiro grau e a obtida no processo de calibração foi do primeiro grau, bem mais simples de ser utilizada em cálculos. Os valores de umidade obtidos na calibração do manual tiveram erros de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto a calibração com solução de $0,31 \text{ dS m}^{-1}$ reduziu o erro pela metade ($0,028 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Os menores erros obtidos nas equações ajustadas demonstraram a necessidade da calibração do sensor para leituras precisas de θ no campo. Apesar da diferença observada entre as soluções salinas (Figura 1), os erros obtidos com o sensor utilizando as equações definidas para cada solução não tiveram diferença significativa ($p > 0,05$). A semelhança entre as equações ajustadas indicam que a calibração do sensor pode ser facilmente realizada com água de torneira, eliminando a necessidade de utilização de água destilada.

CONCLUSÕES

- A precisão nas leituras de umidade do solo é dependente da condutividade elétrica do meio.
- As alterações na salinidade das soluções não apresentaram efeitos significativos na calibração do sensor.
- O maior erro da calibração do manual em relação às calibrações ajustadas indicam a necessidade de calibração prévia.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- FARES, A.; ABBAS, F.; MARIA, D.; MAIR, A. Improved calibration functions of three capacitance probes for the measurement of soil moisture in tropical soils. **Sensors**, v. 11, n. 5, p. 4858-4874, 2011.
- FARES, A.; POLYAKOV, V. Advances in crop water management using capacitive water sensors. **Advances in agronomy**, v. 90, p. 43-77, 2006.
- INOUE, M.; AHMED, B. O.; SAITO, T.; & IRSHAD, M. Comparison of twelve dielectric moisture probes for soil water measurement under saline conditions. **Am. J. Environ. Sci**, v. 4, n. 4, p. 367-372, 2008.
- Decagon Devices. GS3 Water content, EC and Temperature sensors Operator's Manual. Decagon Devices Inc., Pullman, WA (2016).
- QUEMADA, M.; GABRIEL, J. L.; LIZASO, J. Calibration of capacitance probes: laboratory versus field procedures. In: international symposium on soil water measurement using capacitance, impedance and tdt, 3., 2010, murcia. Transactions... Murcia: asabe, 2010. P. 1-9.
- REGALADO, C. M.; RITTER, A.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, R. M. Performance of the commercial WET capacitance sensor as compared with time domain reflectometry in volcanic soils. **Vadose Zone Journal**, v. 6, n. 2, p. 244-254, 2007.

SOUZA, C. F.; PIRES, R. C. M.; DE MIRANDA, D. B.; VARALLO, A. C. T.. Calibração de sonda FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 597, 2013.

SILVA, D. O. M. Validação de um sensor de determinação da umidade do solo para o manejo da irrigação. Dissertação de mestrado, UNIVASF, 2013.

SUN, Z. J.; YOUNG, G. D.; MCFARLANE, R. A.; CHAMBERS, B. M. The effect of soil electrical conductivity on moisture determination using time-domain reflectometry in sandy soil. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 80, n. 1, p. 13-22, 2000.

TOPP, G. CLARKE; DAVIS, J. L.; ANNAN, A.A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water resources research**, v. 16, n. 3, p. 574-582, 1980.

TOPP, G. C.; ZEGELIN, S.; WHITE, I. Impacts of the real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurements in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 4, p. 1244-1252, 2000.