

DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE UMIDADE DO SOLO UTILIZANDO O PRINCÍPIO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA

FRANCISCO AÉCIO DE LIMA PEREIRA¹; JOSÉ FRANCISMAR DE MEDEIROS²; NILDO DA SILVA DIAS²; FRANCISCO VANIES DA SILVA SÁ²; SUEDÊMIO DE LIMA SILVA³ E MIGUEL FERREIRA NETO²

¹*Departamento de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Caraúbas, (Avenida Universitária Leto Fernandes, Sítio Esperança II, CEP: 59780-000, Caraúbas/RN – Brasil), aecio@ufersa.edu.br.*

²*Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Mossoró (Av. Francisco Mota, 572, Bairro Costa e Silva, CEP: 59.625-900, Mossoró/RN, Brasil), jfmedeir@ufersa.edu.br; nildo@ufersa.edu.br; vanies_agronomia@hotmail.com; miguel@ufersa.edu.br*

³*Centro de Engenharias, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Mossoró (Av. Francisco Mota, 572, Bairro Costa e Silva, CEP: 59.625-900, Mossoró/RN, Brasil), suedemio@ufersa.edu.br*

1 RESUMO

A determinação do teor de água do solo é usada para decisões de manejo de irrigação. Com isso, objetivou-se avaliar tipos de eletrodos e materiais de enchimento e encapsulamento no desempenho de sensores de umidade do solo. Com base no princípio da resistência elétrica, diferentes sensores foram confeccionados e avaliados em um delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial de 2 x 5, com dois eletrodos (20 x 5 e 15 x 5 mm) e cinco materiais de enchimento e encapsulamento (areia grossa + gesso com 30% pó de mármore, areia fina + gesso com 30% pó de mármore, lâ de vidro + gesso com 30% pó de mármore, areia fina + gesso com 30% areia fina e areia grossa + gesso com 30% areia fina), com quatro repetições. Os resultados indicaram que os eletrodos de anéis concêntricos de tela de inox fixados com resina de poliéster mantêm uniforme as leituras de condutividade elétrica na medição da tensão da água no solo. Os eletrodos de 20 x 5 preenchidos com areia fina e encapsulado com gesso + pó de mármore foram mais sensíveis às baixas tensões e com leituras mais precisas da umidade do solo.

Palavras-chave: agricultura de precisão, eficiência do uso da água, manejo da irrigação.

PEREIRA, J. A. L.; MEDEIROS, J. F.; DIAS, N. S.; SÁ, F. V. S.; SILVA, S. L.; FERREIRA NETO, M.
DEVELOPMENT OF SOIL MOISTURE SENSOR USING THE PRINCIPLE OF ELECTRIC RESISTANCE

2 ABSTRACT

The determination of soil water content is used for irrigation planning decisions. This study aimed to evaluate electrode types and filling and encapsulation materials on the performance of soil moisture sensors. Based on the principle of electric resistance, different sensors were made and evaluated in a randomized block design in a 2 x 5 factorial scheme with two electrodes (20 x 5 and 15 x 5 mm) and five filling and encapsulation materials (coarse sand + gypsum with

30% marble powder, 30% fine sand + 30% marble sand, 30% sand and gypsum with 30% sand) with four replicates. The results indicated that the concentric stainless steel mesh ring electrodes fixed with polyester resin keep the electrical conductivity readings uniform in the measurement of soil water tension. The 20 x 5 electrode filled with fine sand and encapsulated with gypsum + marble powder were more sensitive to low voltages and with more accurate readings of soil moisture.

Keywords: precision agriculture, water use efficiency, irrigation management.

3 INTRODUÇÃO

Embora a irrigação seja apontada como uma das alternativas para o desenvolvimento socioeconômico das regiões áridas e semiáridas, esta é limitada pela baixa disponibilidade hídrica. Considerando que a agricultura irrigada demanda um grande volume de águas de boa qualidade, cerca de 70% daquela utilizada pelo homem, o manejo e a eficiência do uso da água tornam-se essenciais para um cultivo sustentável (ROST et al., 2008). Para aumentar a eficiência do uso da água é essencial planejar a irrigação, ou seja, saber quanto e quando irrigar a fim de evitar perdas de água e melhorar os rendimentos das culturas (LIMA, 2009). A detecção de conteúdo de água do solo é o principal elemento usado para tomadas de decisões no planejamento de irrigação, sendo amplamente utilizado no manejo da água de irrigação na agricultura (CÁRDENAS-LAILHACAR; DUKES; MILLER, 2010; CÁRDENAS-LAILHACAR; DUKES, 2012, 2014).

Vários são os métodos para estimar a quantidade de água disponível no solo e calcular as necessidades hídricas diárias das plantas, alguns se baseiam na estimativa da evapotranspiração da cultura, outros na medição da variação do status da água no solo. Para a medição da variação do status da água no solo são utilizados os métodos da resistência elétrica (Boyoucus), da tensiometria, da moderação de nêutrons e da reflectometria no domínio do tempo (TDR) (SOUZA et al., 2016). Atualmente, existem

diversos modelos comerciais de sensores de resistência elétrica para determinação da umidade no solo e monitoramento da irrigação, tendo como vantagens o baixo custo, a capacidade de operação em uma larga faixa de umidade do solo, a fácil automação da coleta de dados e a não necessidade de ajuste após a instalação no solo. Todavia, adquirir equipamentos de leitura e sensores no mercado brasileiro é uma tarefa difícil e, na maioria das vezes, esses produtos não possuem vida útil longa, apresentam boa precisão apenas para tensões mais elevadas (30 a 500 kPa), tendo, conseqüentemente, baixa eficiência para uso na irrigação localizada que normalmente opera em tensões menores que 30 kPa.

Deste modo, objetivou-se avaliar tipos de eletrodos e de matérias de enchimento e encapsulamento no desempenho de sensores de umidade do solo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo de confiabilidade e precisão dos sensores de resistência foi realizado no Laboratório de Irrigação e Drenagem da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA).

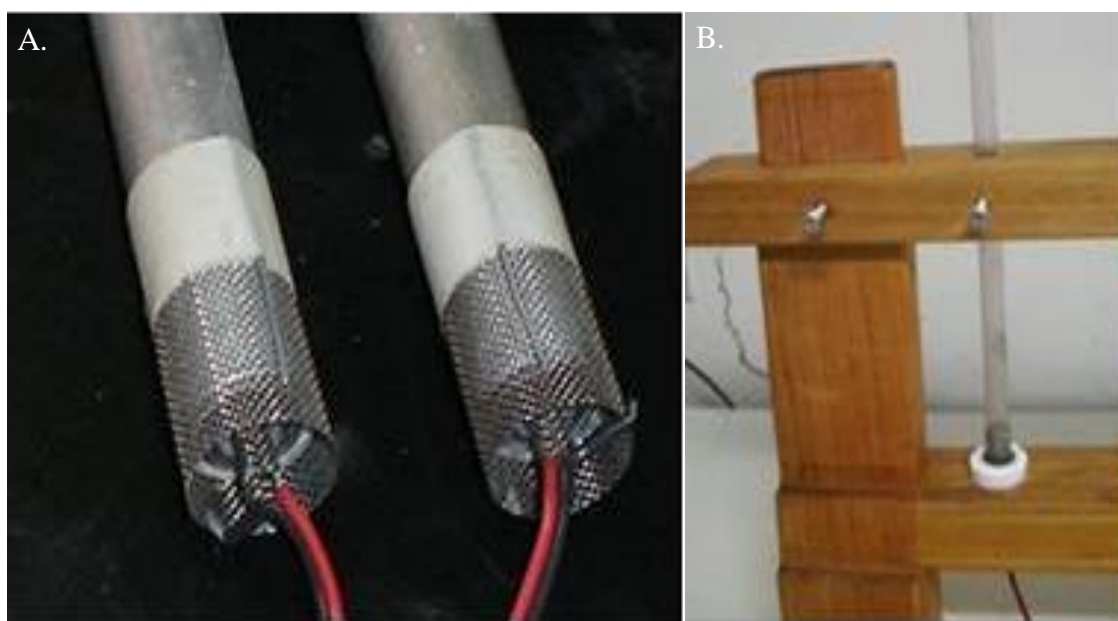
Os sensores foram confeccionados com telas inox de 30 mesh cortadas com 23 mm de altura e feito cilindros com quatro diâmetros (5, 10, 15 e 20 mm), compondo os eletrodos dos sensores. Para confeccionar o anel, utilizou-se solda eletrônica para unir as duas extremidades da tela retangular e,

também, para unir o fio aos anéis. O fio usado foi de 2 x 0,5 mm² de 1 m de comprimento para cada sensor com revestimento bicolor, com um fio ligado a cada anel.

Utilizou-se resina de poliéster na fabricação da base do sensor, deixando os anéis (eletrodos) concêntricos e com a altura (parte externa) de 19 mm, sendo os 4 mm restantes fixos na resina. A união do fio com

os anéis de tela ficou dentro da resina, para uniformizar a área externa e proporcionar mais segurança no manuseio. No processo de montagem dos eletrodos foram usados moldes para sustentação dos anéis e uma estrutura de madeira que servia de suporte para aplicar a resina. Os moldes foram formados por dois canos concêntricos (um dentro do outro), servindo para ajustar os eletrodos no centro da base formada de resina (Figuras 1A).

Figura 1. (A) Moldes dos eletrodos e (B) estrutura para aplicação de resina.



A base do sensor foi construída de gesso com abertura correspondendo às dimensões da base de resina desejada. Essa forma foi feita utilizando um bastão com o diâmetro desejado e copos descartáveis como forma, justamente para facilitar a construção do sensor. Neste formato, ocorria a secagem da resina e a fixação dos eletrodos, e a mesma tinha diâmetros iguais ao da forma externa de encapsulamento do sensor. Por ser um material poroso, o gesso foi usado como impermeabilizante a fim de evitar a penetração da resina nos poros e

facilitar a remoção da forma. O desmolde foi realizado destruindo a forma de gesso.

Os eletrodos foram construídos em duas configurações, as quais foram: 20 x 5 e 15 x 5 mm (Figura 2). Posteriormente, os eletrodos foram identificados, determinando-se a constante de célula por meio da medição da condutividade elétrica (CE) utilizando-se condutivímetro de bancada (faixa de medição entre 20 a 2000 dS m⁻¹, com precisão de 1% FS e sem compensação da temperatura).

Figura 2. Eletrodos construídos com moldes de tela inox com (A) 20 x 5 mm, (B) 15 x 5 mm e (C) sensores encapsulados.



Para medir essas constantes foram usadas quatro soluções salinas com condutividades elétricas de 1,41; 4,73; 9,20 e 11,91 dS m^{-1} e esses valores foram empregados para correlacionar as leituras de condutividade elétrica obtidas nos sensores com as leituras reais de condutividade elétrica das quatro soluções salinas.

No processo de encapsulamento, para os materiais interno e externo distintos, inicialmente foi colocado o material interno entre os eletrodos e, em seguida, o espaço poroso do material foi preenchido com uma solução saturada de gesso ($\text{CE} = 2,20 \text{ dS m}^{-1}$), para facilitar o equilíbrio entre a CE interna e a CE do material de revestimento. Já para materiais internos e externos semelhantes, misturou-se ao gesso em pó, preparou-se a pasta saturada e aplicou-se ao mesmo tempo, preenchendo os eletrodos e o encapsulamento.

Para o revestimento interno e externo com o mesmo material ou completo com o mesmo material, o gesso foi misturado a 30% de um material inerte, areia ou pó de mármore, com a finalidade de elevar a porosidade para melhorar a resposta em baixa tensão. O volume de água adicionado, foi o do gesso em base volume, com acréscimo em água de metade do volume do material inerte (pó de mármore). O encapsulamento foi feito usando formas de PVC com os diâmetros iguais ao da base do eletrodo, e alturas padronizadas de 3,0 cm, ficando o sensor com a altura final de 3,0 cm

(Figura 2C). Após 10 minutos, as formas de PVC eram retiradas e os sensores prontos eram colocados em estufa a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ até a completa secagem.

Para a avaliação dos sensores foram selecionados dois tipos de eletrodos: 20 x 5 mm e 15 x 5 mm. Cada eletrodo foi submetido aos tratamentos formando o delineamento experimental em blocos inteiramente casualizados, com quatro repetições para cada tratamento. Utilizou-se o esquema fatorial de 2 x 5, sendo 2 sensores confeccionados com eletrodos de 20 x 5 mm e de 15 x 5 mm, e os cinco materiais de enchimento e encapsulamento: areia grossa + gesso com 30% de pó de mármore, areia fina + gesso com 30% de pó de mármore, lã de vidro + gesso com 30% de pó de mármore, areia fina + gesso com 30% de areia fina e areia grossa + gesso com 30% de areia fina.

Para a calibração dos sensores encapsulados, após montados, estes foram colocados em anéis com 50 mm de diâmetro e 50 mm de altura, e preenchidos com solo coletado na camada de 0-30 cm. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico argissólico, (Santos et al., 2013), e suas características físico-químicas estão na Tabela 1. Com o sensor instalado no solo, os anéis foram saturados por 24 h, a condutividade elétrica de cada sensor foi mensurada e, em seguida, os sensores foram submetidos a diferentes tensões (SCHOLL, 1978; DELA, 2001).

Tabela 1. Atributos físico-químicos do material de solo utilizado para calibrar os sensores

Características químicas									
pH	MO	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H + Al ³⁺	PST	CEes
H ₂ O	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³	-----cmol _c dm ⁻³ -----				%	dS m ⁻¹	
5,4	8,28	2,0	0,16	0,05	1,6	1,10	0,33	1	0,11
Características Físicas									
Fração granulométrica (g.kg ⁻¹)							Classe Textural		Ds
Areia		Silte		Argila					
776		24		200		Franco Arenoso			1,44
									kg.dm ³

MO – Matéria orgânica: Digestão Úmida Walkley-Black; Ca²⁺ e Mg²⁺ extraídos com KCl 1 M pH 7,0; Na⁺ e K⁺ extraídos utilizando-se NH₄OAc 1 M pH 7,0; Al³⁺ e (H⁺ + Al³⁺) extraídos utilizando-se CaOAc 0,5 M pH 7,0; CEes – condutividade elétrica do extrato de saturação do solo; Ds - Densidade do solo.

Os sensores foram submetidos às seguintes tensões: 2; 4; 5; 10; 20; 40; 60; 80 kPa. As três primeiras em mesa de tensão (Figura 3A), constituída de funis de inox e material inerte de granulometria areia fina ou silte (pó de mármore). Para as demais tensões foram utilizadas placas de pressão

e placas de Richards (Figura 3B), que consiste de placa porosa com uma de suas faces interligada ao ambiente e outra para aplicar tensão (pressão) em kPa no interior da panela retirando a umidade, sendo equivalente ao potencial matricial ao qual o solo e o sensor ficam submetidos.

Figura 3. (A) Mesa de tensão e saturação das amostras e (B) panela de pressão com os anéis de solo sobre a placa porosa

Para avaliar os sensores foram realizadas leituras de CE nas diferentes tensões e tratamentos. Os valores de CE foram convertidos em CE relativas medidas quando os mesmos estavam saturados (tensão zero) antes da submissão às tensões testadas. Realizou-se uma comparação entre as repetições de cada tratamento e a partir de que tensão houve variação da CE. A substituição da medida da resistência pela medida da CE ocorreu devido a não estabilização das leituras em multímetros de corrente contínua, o que não aconteceu com condutivímetros, mesmo sendo portáteis, apresentam fundo de escala de 20 dS m⁻¹,

sendo necessário apenas uma modificação, que consistiu em fazer uma substituição da célula de carga por duas garras (jacaré) para conecta-las aos fios dos sensores.

Os sensores foram avaliados pelo coeficiente de variação entre as leituras de condutividade elétrica real e relativa, após a identificação do melhor sensor procedeu-se análise de regressão a fim de identificar o modelo mais adequado na avaliação da tensão de água no solo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os blocos de gesso e sensores quando saturados por várias vezes, variaram seus valores de condutividade elétrica absoluta e relativa tanto entre as etapas de saturação (Figuras 4, 5, 6 e 7). Nesse caso, os sensores mais estáveis foram aqueles confeccionados com o mesmo material para preenchimento/encapsulamento ou os eletrodos de maior espaço entre os anéis (20 x 5 mm) que tinham preenchimento/encapsulamento de areia fina/gesso + 30% de mármore. Assim, materiais de textura grossa no interior do sensor e muito fina na parte externa, principalmente quando o espaço entre os anéis é menor apresentaram-se mais instáveis à saturação, este comportamento observado, pode ter ocorrido devido ao aprisionamento de bolhas de ar no processo de saturação/ressaturação (DELA, 2001).

Como o gesso é um material que tem dificuldade em obter volume de poros e distribuição que produza uma resistência elétrica uniforme no interior do material, há dificuldade de fazer a saturação entre os eletrodos a menos de 33 kPa (SCHOLL, 1978).

Essa variação do material interfere na saturação dos sensores, dificultando o processo de calibração, pois seria necessário fazer vários pontos de uma de curva de retenção para usar como variáveis na calibração e, por outro lado, quando são uniformes necessitam apenas de um ponto para a calibração.

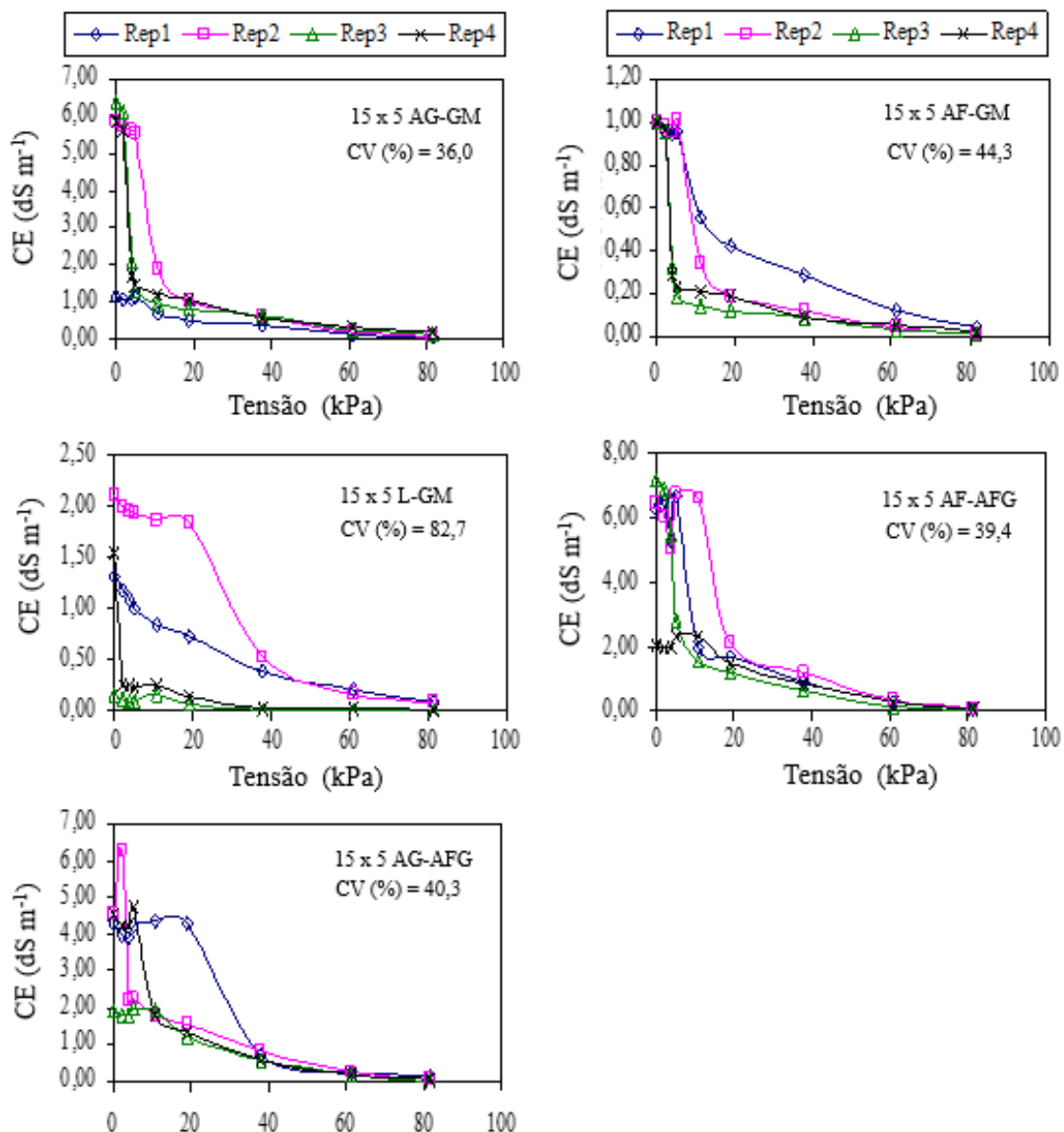
Com relação ao erro relacionado às variações de temperatura, este pode ser evitado ou reduzido em campo, conduzindo-se leituras sempre no mesmo horário, preferencialmente no início da manhã, pois nesse período a temperatura do solo não varia entre os dias, sobretudo nas regiões tropicais.

Observa-se que os eletrodos de 20 x 5 mm apresentaram leituras mais uniformes do que os eletrodos 15 x 5 mm (Figura 4, 5, 6 e 7), provavelmente, devido a quantidade do material de enchimento ser em maior volume e uniformizar melhor a umidade interna dos eletrodos, sendo obtidas leituras mais estáveis. Para os sensores que tiveram o enchimento interno com gesso, as leituras de saturações foram mais uniformes com coeficiente de variação baixo para a saturação (Figuras 5), entretanto, na faixa de umidade elevada (baixas tensões), os sensores não tiveram uma sensibilidade desejada para seu uso na agricultura, principalmente para o manejo de sistemas de irrigação localizada, que operam em baixas tensões (menores que 30 kPa).

Os sensores de umidade que apresentaram maior estabilidade nas leituras e melhor sensibilidade às baixas tensões, foram: AF-GM (areia fina + gesso + 30% de pó de mármore) e AF-AFG (areia fina + 30% areia fina + 70% gesso) associados ao eletrodo de 20 x 5 mm (Figura 6 e 7), apresentando uma variação média de 4,7% entre as repetições, nas distintas condições de tensões estudadas.

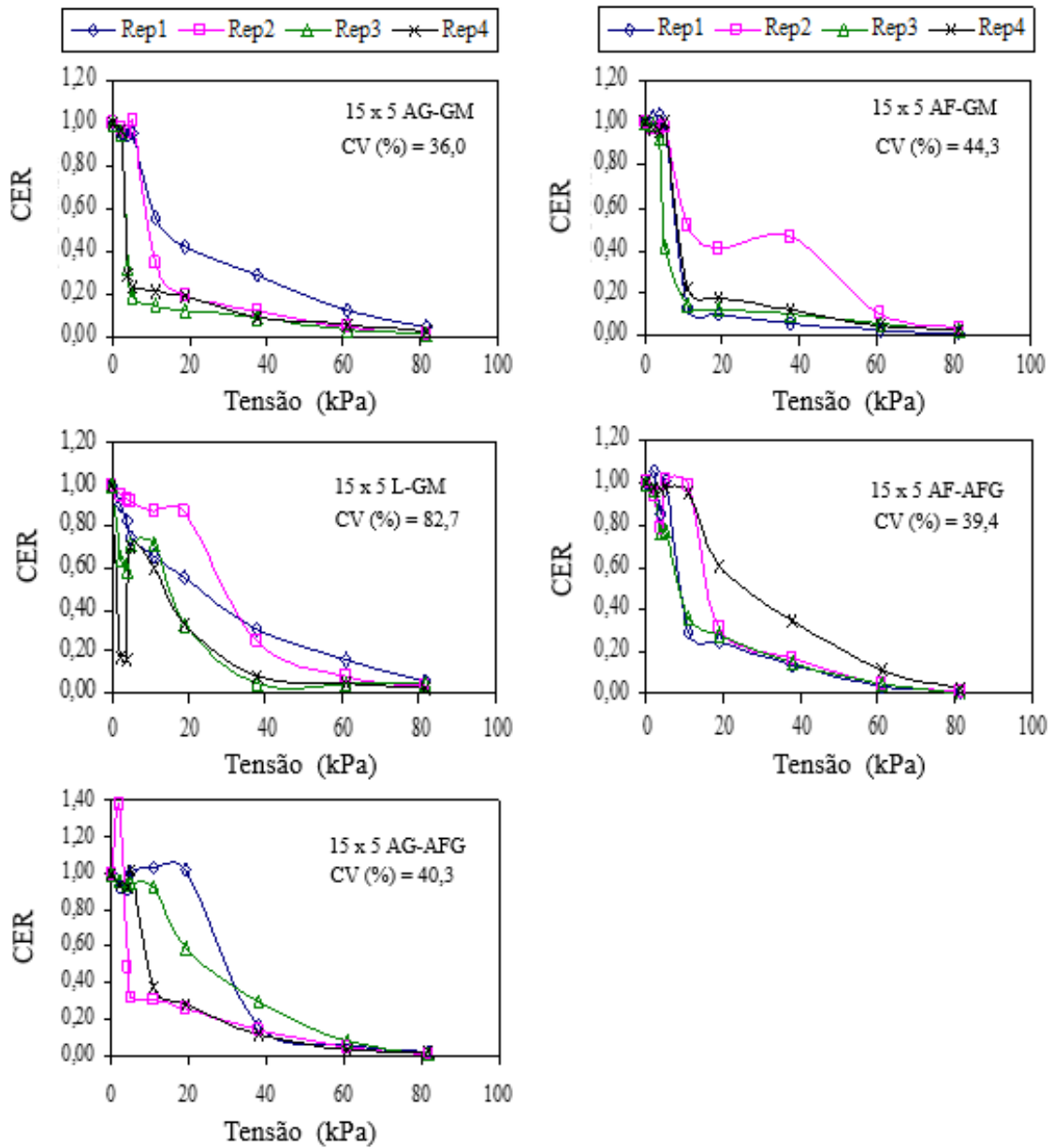
Observou-se que a areia fina associada ao gesso apresentou menores variações em relação ao gesso isolado, o que pode provavelmente ser explicado pelo fato de a areia fina proporcionar ao gesso maior volume de poros, permitindo que este conjunto produza condutividade elétrica uniforme no interior do material. Todavia, o uso da CE tomadas nas diferentes tensões (CE absoluta) em relação a CE mensurada quando apenas o eletrodo estava saturado (CE relativa), não alterou de forma significativa o comportamento das curvas para os sensores estáveis, porém, teve como vantagem a obtenção de valores com menor variação entre os tipos de eletrodos.

Figura 4. Condutividade elétrica absoluta e relativa dos sensores 15 x 5 mm submetidos a diferentes tensões em KPa.



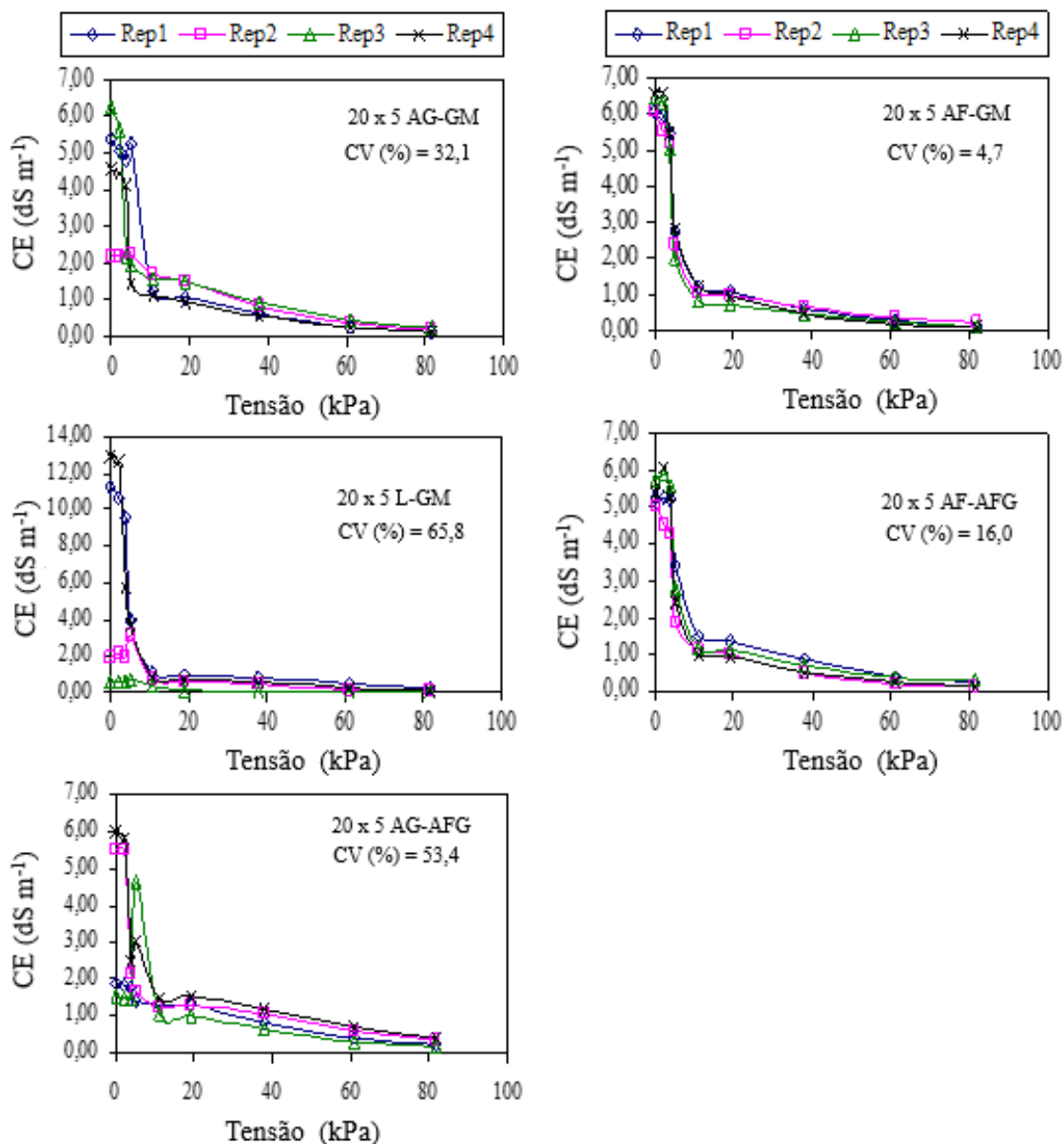
Nota: 15 x 5 – Eletrodos com diâmetros externo de 15 mm e interno de 5 mm; GM – Gesso + 30% de pó de mármore; L – Lã de vidro; AF – Areia fina (granulometria entre 0,1 e 0,2 mm); AG – Areia grossa (granulometria entre 0,2 e 0,4 mm); AFG – 30% Areia fina + 70% gesso

Figura 5. Condutividade elétrica relativa (CER) dos sensores 15 x 5 mm submetidos a diferentes tensões em KPa.



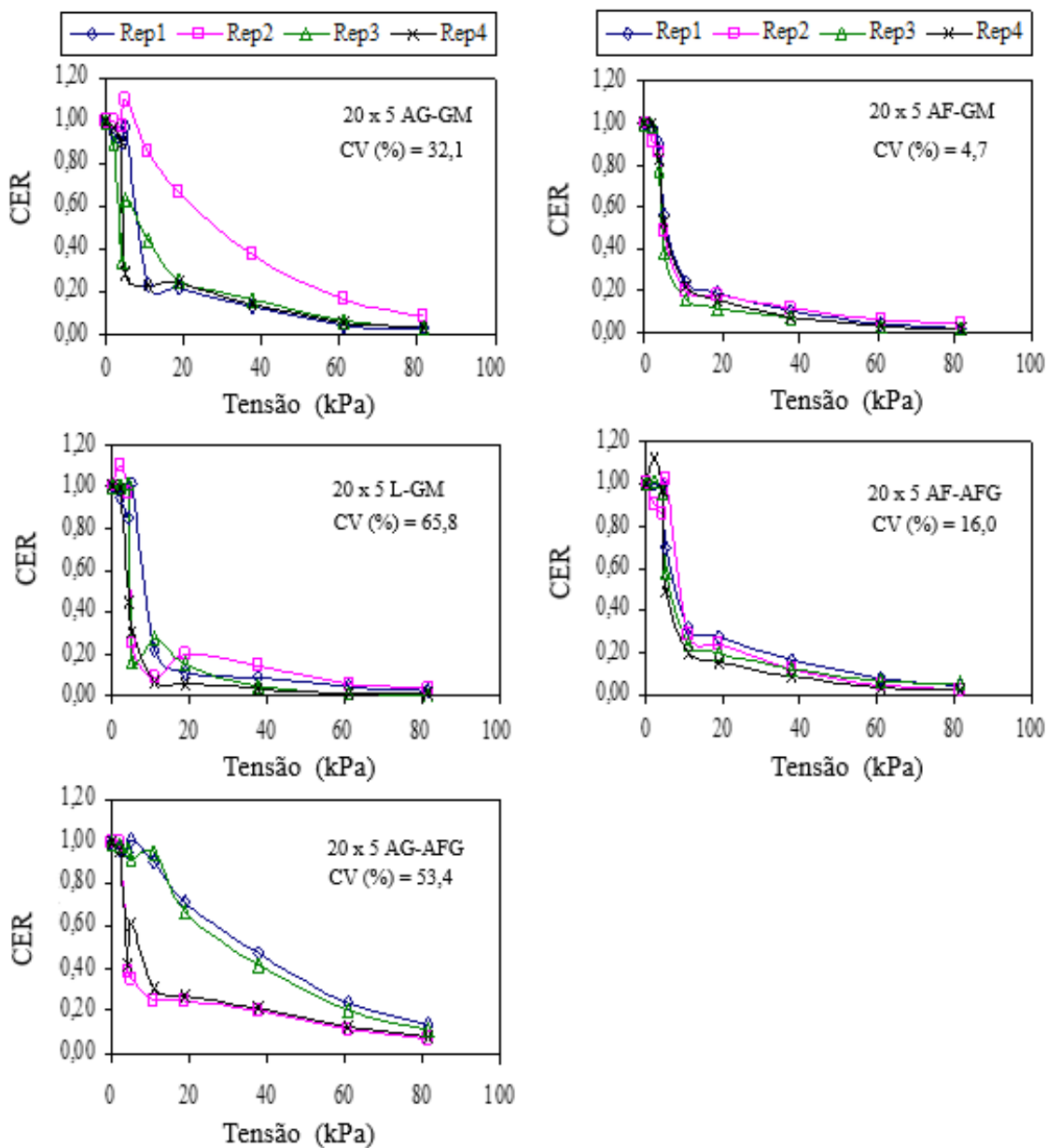
Nota: 15 x 5 – Eletrodos com diâmetros externo de 15 mm e interno de 5 mm; GM – Gesso + 30% de pó de mármore; L – Lã de vidro; AF – Areia fina (granulometria entre 0,1 e 0,2 mm); AG – Areia grossa (granulometria entre 0,2 e 0,4 mm); AFG – 30% Areia fina + 70% gesso

Figura 6. Condutividade elétrica absoluta dos sensores 20 x 5 mm submetidos a diferentes tensões em KPa.



Nota: 20 x 5 – Eletrodos com diâmetros externo de 20 mm e interno de 5 mm; GM – Gesso + 30% de pó de mármore; L – Lã de vidro; AF – Areia fina (granulometria entre 0,1 e 0,2 mm); AG – Areia grossa (granulometria entre 0,2 e 0,4 mm); AFG – 30% Areia fina + 70% gesso

Figura 7. Condutividade elétrica relativa (CER) dos sensores 20 x 5 mm submetidos a diferentes tensões em KPa.

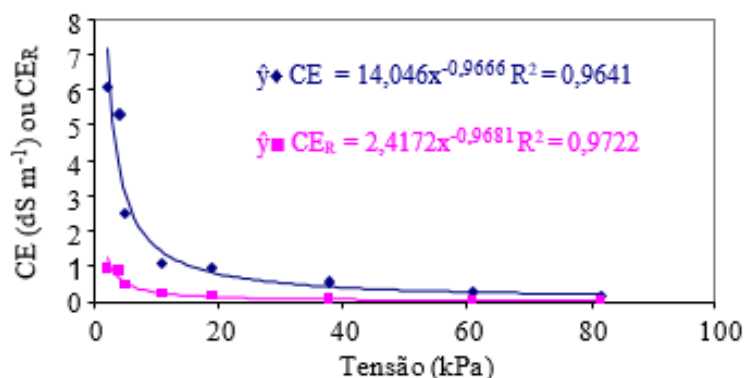


Nota: 20 x 5 – Eletrodos com diâmetros externo de 20 mm e interno de 5 mm; GM – Gesso + 30% de pó de mármore; L – Lã de vidro; AF – Areia fina (granulometria entre 0,1 e 0,2 mm); AG – Areia grossa (granulometria entre 0,2 e 0,4 mm); AFG – 30% Areia fina + 70% gesso

Desprezando a umidade de saturação, o modelo potência, que foi muito próximo ao hiperbólico apresentou um melhor ajuste entre os modelos simples com apenas um parâmetro. A Figura 8 apresenta as equações dos modelos potência que melhor se ajustaram aos dados observados

de CE (absoluta) ou CER (relativa) sob as tensões estudadas. Observa-se os coeficientes de determinação (R^2) de 96,41 e 97,22% para a CE e CER , respectivamente. Estes modelos foram semelhantes aos modelos adotados no ajuste de curvas de retenção, como o de van Genuchten.

Figura 8. Relação entre a CE (absoluta) ou CER (relativa) com as tensões estudadas, para os eletrodos com 20 x 5 mm, preenchidos com areia fina e encapsulado com gesso + pó de mármore. Colocar largura 10 ou 15 cm



Com o método resistência elétrica, a umidade do solo mensurada com os eletrodos com 20 x 5 mm, preenchidos com areia fina e encapsulado com gesso + pó de mármore, apresentaram alta confiabilidade (96,41%) das medidas de CE, sendo esta superior a confiabilidade observada na literatura especializada para os métodos eletromagnéticos: Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e a Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) (CRUZ et al., 2010; SILVA et al., 2012; BUESA-PUEYO, 2013; SOUZA et al., 2013; SCHWARTZ et al., 2013; SOUZA et al., 2016; GOMES et al., 2017; MATOS et al., 2017).

6 CONCLUSÕES

1. Os sensores confeccionados com o mesmo material de enchimento e encapsulamento e, ainda aqueles que não apresentaram grande variação textural e eletrodos com maior espaço entre os anéis, apresentaram leituras de CE mais uniformes na ressaturação e curvas de tensão versus CE similares entre os mesmos.

2. Os eletrodos de 20 x 5 mm preenchidos com areia fina e encapsulado com gesso + pó de mármore foram mais sensíveis a baixas tensões e apresentaram leituras mais precisas da umidade do solo.

7 AGRADECIMENTO

Ao IEL/SEBRAE/CNPq e a Empresa Telecomunicações e Eletrônica Ltda (GITEL) pela disponibilização de auxílio financeiro e pagamento de bolsa.

8 REFERÊNCIAS

- BUESA-PUEYO, I. **Determinación del estado hídrico del suelo mediante sondas FDR en vid CV. Moscatel de Alejandría regada por goteo.** 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Meio Ambiente) – Universitat Politècnica de València, València, 2013.
- CÁRDENAS–LAILHACAR, B.; DUKES, M. D. Effect of temperature and salinity on the precision and accuracy of landscape irrigation soil moisture sensor systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 141, n. 7, p. 04014076, 2014.

CÁRDENAS–LAILHACAR, B.; DUKES, M. D.; MILLER, G. L. Sensor–based automation of irrigation on Bermudagrass during dry weather conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 136, n. 2, p. 184-193, 2010.

CÁRDENAS–LAILHACAR, B.; DUKES, M. D. Soil moisture sensor landscape irrigation controllers: A review of multi–study results and future implications. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Saint Joseph, v. 55, n. 2, p. 581-590, 2012.

CRUZ, T. M. L.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; SANTOS C. C.; OLIVEIRA, A. D. S.; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p. 33-45, 2010.

DELA, B. F. **Measurement of soil moisture using gypsum blocks**. 1. ed. Horsholm: By Og Byg, 2001. 28 p. (Documentation, 004).

GOMES, F. H. F.; CUNHA, F. N.; LOPES FILHO, L. C.; VIDAL, V. M.; SOARES, F. A. L.; TEIXEIRA, M. B. Calibração de um sensor de umidade do solo de baixo custo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 4, p. 1509-1516, 2017.

LIMA, C. J. G. S. **Calibração e manejo de extratores de cápsulas porosas e transdutores de pressão para monitoramento de íons na fertirrigação**. 2009. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

MATOS, R. M.; DANTAS NETO, J.; LIMA, A. S.; SILVA, P. F.; BORGES, V. E.; GALVÃO SOBRINHO, T. Teor de umidade por diferentes métodos em Neossolo do semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 4, p. 1588-1597, 2017.

ROST, S.; GERTEN, D.; BONDEAU, A.; LUCHT, W.; ROHWER, J.; SCHAPHOFF, S. Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. **Water Resources Research**, Washington, v. 44, n. 9, p. 1-11, 2008.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e aum. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

SCHOLL, D. G. A two-element ceramic sensor for matric potential and salinity measurements. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 42, n. 3, p. 429-432, 1978.

SCHWARTZ, R. C.; CASANOVA, J. J.; BELL, J. M.; EVETT, S. R. A reevaluation of TDR propagation time determination in soils. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 13, n. 12, p. 1-13, 2013.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA JÚNIOR, J. J.; COLOMBO, A.; LIMA, J. M. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 2, p. 277-286, 2012.

SOUZA, C. F.; PIRES, R. C. M.; MIRANDA, D. B.; VARALLO, A. C. T. Calibração de sondas FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 4, p. 597-606, 2013.

SOUZA, C. F.; SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; COELHO, E. F. Monitoring of soil water content in real time with TDR and FDR technique. **Irriga**, Botucatu, v. especial, n. 1, p. 26-42, 2016.