

Sensores de diedro para a medida do potencial matricial da água no solo



ISSN 1518-7179

Dezembro, 2023

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Instrumentação
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
47**

**Sensores de diedro para a medida do
potencial matricial da água no solo**

*Carlos Manoel Pedro Vaz
Paula Fernanda Felipe Pazatto
Daniel Botta de Siqueira
Ladislau Marcelino Rabello
André Torre-Neto
José Ferrazini Júnior
Luiz Fernando Porto*

*Embrapa Instrumentação
São Carlos, SP
2023*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Instrumentação
Rua XV de Novembro, 1452
Caixa Postal 741
CEP 13560-970 São Carlos, SP
Fone: (16) 2107 2800
Fax: (16) 2107 2902
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente
Daniel Souza Corrêa

Membros
Elaine Cristina Paris
Maria Alice Martins
Cristiane Sanchez Farinas
Cinthia Cabral da Costa
Carlos Renato Marmo
Paulo Renato Orlandi Lasso
Maria do Socorro Gonçalves de Souza Monzane

Editoração eletrônica e
tratamento das ilustrações
Valentim Monzane

Foto da capa
Samuel Vasconcelos

1ª edição
1ª impressão (2023): 100 exemplares

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610)

Dados internacionais de Catalogação na publicação (CIP)

Embrapa Instrumentação

Sensores de diédro para a medida do potencial matricial da água no solo / Carlos Manoel Pedro Vaz, Paula Fernanda Felipe Pazatto, Daniel Botta de Siqueira, Ladislau Marcelino Rabello, André Torre Neto, José Ferrazini Júnior, Luiz Fernando Porto. – São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2023.
PDF (17 p.). : il. ; (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Instrumentação, ISSN 1518-7179; 47).

1. Lei de Laplace. 2. Potencial da água no solo. 3. Sensor. I. Vaz, Carlos Manoel Pedro. II. Pazatto, Paula Fernanda Felipe. III. Siqueira, Daniel Botta de. IV. Rabello, Ladislau Marcelino. V. Torre Neto, André. VI. Ferrazini Júnior, José. VII. Porto, Luiz Fernando. VIII. Título. IX. Série.

CDD (21. ed.) 631

Vera Viana dos Santos Brandão (CRB – 8/7283)

© Embrapa, 2023

Sumário

Resumo.....	5
Abstract.....	7
Introdução.....	9
Material e Métodos.....	10
Resultados e Discussão.....	13
Conclusões	16
Agradecimentos.....	17
Referências	17

Sensores de diedro para a medida do potencial matricial da água no solo

Carlos Manoel Pedro Vaz¹
Paula Fernanda Felipe Pazatto²
Daniel Botta de Siqueira³
Ladislau Marcelino Rabello⁴
André Torre-Neto⁵
José Ferrazini Júnior⁶
Luiz Fernando Porto⁷

Resumo - Neste trabalho são apresentados os princípios gerais de funcionamento do sensor de diedro para a medida do potencial matricial da água no solo (ψ). O sensor é composto por 2 placas de vidro planas hidrofílicas retangulares ou uma placa de vidro com uma placa plana porosa fina, fixadas em ângulo, definindo o ângulo diédrico. A distância do vértice ao menisco de água (L) formado após o equilíbrio é proporcional a ψ . Usando diferentes espessuras de espaçador entre as duas placas planas permite a construção de sensores para diferentes faixas de ψ e aplicações. Foram produzidos sensores com diferentes configurações e materiais (vidro-vidro e vidro-gesso), cobrindo faixas de medidas entre 0 e 55 kPa, em função do diâmetro do espaçador. O trabalho apresenta recomendações para a montagem e teste dos sensores, bem como um protótipo de um sensor de diedro automático, utilizando um sensor de capacitância elétrica, e vidro de espelho como eletrodos. Os testes realizados mostraram uma boa correlação das medidas do sensor de diedro com o tensiômetro de cápsula porosa, com precisões de medida que variaram de 1 a 4 kPa, dependendo dos materiais e geometrias utilizadas. O sensor de diedro automático apresentou resposta não linear do tipo função de potência, similar à observada na relação de L com ψ , com potencial de desenvolvimento de um produto para uso no controle da irrigação e outras aplicações na área agrícola e ambiental.

Termos de indexação: Potencial da água no solo, Sensor, Lei de Laplace

¹ Físico, doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP.

² Graduada em Engenharia Agrônoma, aluna do Centro Universitário Central Paulista, São Carlos, SP.

³ Engenheiro Agrônomo, bolsista FAPESP, Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP.

⁴ Engenheiro Elétrico, doutor Engenharia Elétrica, pesquisador da Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP.

⁵ Engenheiro Elétrico, doutor em Física, pesquisador da Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP.

⁶ Técnico em Eletrônica, Técnico da Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP.

⁷ Engenheiro Mecânico, pesquisador da Tecnicer Tecnologia Cerâmica, São Carlos, SP.

Dihedral sensors for measuring the soil water matric potential

Abstract - This work presents the general principles of the dihedral sensor for measuring the soil water matric potential (ψ). The sensor is composed of 2 rectangular hydrophilic flat glass plates or a glass plate with a thin flat porous plate disposed at an angle, defining the dihedral angle. The distance from the vertex to the water meniscus (L) formed after equilibrium is proportional to ψ . Using different spacer thicknesses between the two flat plates allows the construction of sensors for different ψ ranges and applications. Sensors were produced with different configurations and materials (glass-glass and glass-plaster), covering measurement ranges between 0 and 55 kPa, depending on the diameter of the spacer. The work presents recommendations for assembling and testing sensors, as well as an automatic dihedral sensor prototype, using an electrical capacitance sensor and mirror glass as electrodes. The tests carried out presented good correlations between the dihedral sensor and the porous cup tensiometer measurements, with accuracies varying from 1 to 4 kPa, depending on the materials and geometries used. The automatic dihedral sensor presented a non-linear response (power function type), similar to that observed between L and ψ , with possibility of developing devices for technical irrigation control and other applications in the agricultural and the environment.

Indexing Terms: Soil water potential, Sensor, Laplace's law

Introdução

O potencial matricial da água no solo (ψ) é um parâmetro relacionado com a força com que a água está retida no solo e conseqüentemente com a facilidade com que as raízes das plantas retiram a água dos poros do solo. A medida de ψ é normalmente realizada por tensiômetros de cápsula porosa com manômetro com agulha, eletrônico ou manômetro de mercúrio. Esses tensiômetros são referência para a medida de ψ , mas possuem alguns inconvenientes como a ocorrência de embolia ou cavitação quando ψ é maior (mais negativo) que o equivalente à pressão barométrica.

Visando superar essa limitação do tensiômetro, a Embrapa desenvolveu um novo dispositivo denominado sensor de diedro ou tensiômetro diédrico (Calbo, 2011), composto por 2 placas de vidro unidas em configuração não paralela, com geometria de ângulo diédrico ou diedro (dois semi-planos não-coplanares, com origem numa mesma reta), com um fino filme de água entre as placas. A distância entre o vértice e o menisco (L_i) e a distância entre as duas placas na posição do menisco (a_i) estão relacionadas à tangente do ângulo diédrico (α), como ilustrado na Figura 1a.

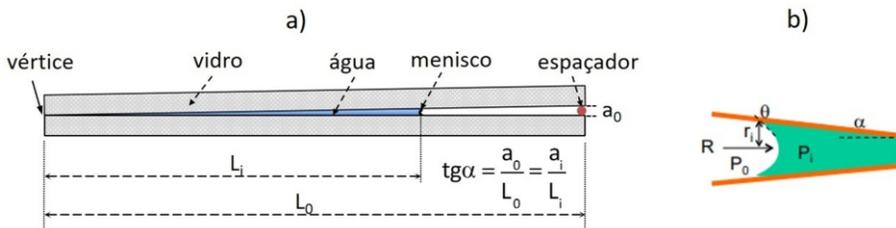


Figura 1. Esquema ilustrativo de um sensor ou tensiômetro diédrico (a) e detalhes da interface líquido-gás na região do menisco (b).

A pressão entre duas placas não paralelas em diedro é definida pela equação de Young-Laplace, que relaciona o raio de curvatura (R) de uma interface líquido-gás (Fig. 1b) com a diferença de pressão na interface, conforme a Eq. 1, onde P_0 é a pressão atmosférica, P_i a pressão do líquido na interface líquido-gás e σ a tensão superficial da água ($0,0728 \text{ N m}^{-1}$ a 20°C). O raio de curvatura pode ser expresso pela Eq. 2 (Berthier e Silberzan, 2010), onde r_i é a metade da distância entre as placas de vidro na posição do menisco ($a_i=2r_i$), θ o ângulo de molhamento e α o ângulo diédrico. Substituindo a Eq. 2 na Eq. 1 e considerando a pressão $P_0=0$ (câmara aberta), $\cos(\alpha+\theta)\approx 1$, pois $\alpha+\theta\approx 0$, obtêm-se a Eq. 3, que relaciona a pressão P_i com a distância entre as duas placas em i . A distância a_i , pode ser expressa por $a_i=L_i \text{ tg}\alpha$ (Fig. 1a), permitindo a determinação de P_i , que é igual ao potencial matricial da água no solo, pela simples medida de L_i , uma vez que $\text{tg}\alpha$ é constante para um determinado sensor de diedro e definido pelo comprimento L_0 e o espaçador a_0 .

$$P_0 - P_i = \frac{\sigma}{R} \quad (1)$$

$$R = \frac{r_i}{\cos(\alpha + \theta)} \quad (2)$$

$$P_i = -\frac{2\sigma}{a_i} \quad (3)$$

$$P_i = \psi_i = -\frac{2\sigma}{L_i \operatorname{tg}\alpha} \quad (4)$$

Um estudo realizado utilizando sensores de diedro com 2 placas de vidro, vidro e gesso retificado e vidro/cerâmica mostrou uma resposta linear dos sensores de diedro em função da sucção aplicada (ψ) em uma câmara de sucção com manômetro de mercúrio (Vaz et al., 2013). Nesse estudo, testes realizados em um solo de textura média e em um substrato orgânico mostraram precisões de cerca de 3 a 4% na medida com os 3 tipos de sensores testados. Este boletim de P&D apresenta os princípios de funcionamento do sensor de diedro, recomendações para a montagem de teste, bem como um protótipo automático do sensor.

Materiais e Métodos

Uma das dificuldades dos sensores de diedro é a fabricação padronizada para a obtenção de respostas reprodutíveis e com boa durabilidade ao longo do tempo. Os fatores que influenciam o desempenho adequado dos sensores são: i) boa limpeza da superfície do vidro; ii) boa pressão entre as duas placas durante a colagem para a correta formação do ângulo diédrico; iii) abertura para o contato com a pressão atmosférica; iv) vedação da lateral das placas, evitando que a resina epóxi utilizada para a colagem das placas penetre no interior da cavidade do sensor; e v) pintar com tinta preta, uma face de uma das placas de vidro para melhorar a visualização do menisco de água. Considerando essas questões, foram testados diversos procedimentos de construção dos sensores de diedro, sendo estabelecido o seguinte processo de construção:

- Pintar uma das faces de vidro com tinta preta (Fig. 2a);
- Limpeza do vidro: lavar com detergente; secar com papel toalha, limpar com desengordurante (ciff) utilizando pano macio; esfregar a superfície com papel toalha seco;
- Fazer pequenos canais (sulcos) nas bordas das 2 placas de vidro utilizando esmeril (Fig. 2b);
- Utilizar fita adesiva como espaçador (Fig. 2b) (medir a espessura com micrômetro). Posicionar o espaçador, defasando uma placa de vidro da outra e prender com grampo tipo prendedor de papel "Binder" (Fig. 2c);

- Colar filetes de papel alumínio nas bordaduras laterais entre as 2 placas com cola tipo super bonder (Fig. 2d) antes da colagem das placas com resina epóxi;

- Utilizar resina epóxi (araldite) de cura rápida (10 min.) para colar as laterais das 2 placas de vidro (Fig. 2e).



Figura 2. Procedimento de construção de sensores de diedro com 2 placas de vidro (a,b,c,d,e) e a configuração final de um sensor de 2 placas de vidro (f), uma de gesso e outra de vidro (g).

Uma outra configuração possível de sensores de diedro utiliza uma placa de gesso substituindo uma das de vidro (Fig 2g). Essa configuração tem a vantagem do tempo de resposta mais rápido (5 a 10 min.) em comparação aos diedros de 2 placas de vidro (Fig. 2f), que é de 30 a 60 minutos. Para a obtenção de placas de gesso retificadas (extremamente planas, como desejado para o sensor de diedro), monta-se um molde retangular sobre uma outra placa maior de vidro e depois de desenhada a superfície do gesso que ficou em contato com o vidro apresentará uma superfície extremamente plana. Para a aferição dos sensores de diedro utilizou-se uma câmara de sucção construída com materiais simples como recipiente de vidro reutilizados (vidro de palmito, azeitona, etc.), tubos de plástico e silicone colados com araldite, cerâmica de filtro de água, placa de PVC; uma bomba de baixo vácuo do tipo das utilizadas em hospitais para a sucção de fluidos (Aspirador Aspiramax, MA 520-60) e um manômetro de Hg construído com tubo de vidro em forma de “U” (Fig. 3).

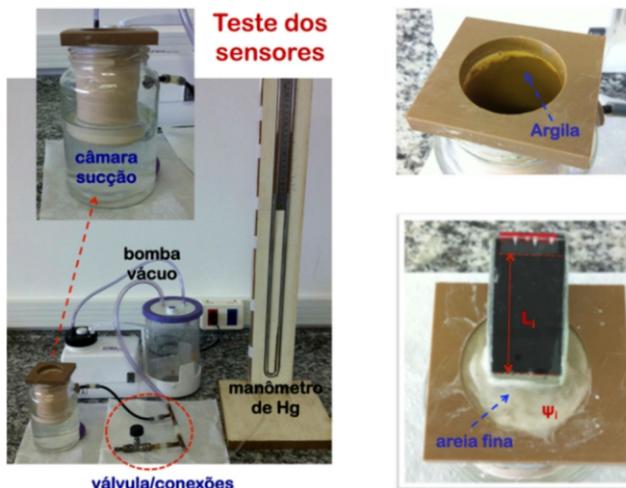


Figura 3. Câmara de sucção para a aferição de sensores de diedro composta de recipiente de vidro com cerâmica de filtro de água, bomba de vácuo e manômetro de mercúrio.

Uma das limitações do sensor IGstat é que a medida da altura do menisco é realizada manualmente com uma régua graduada. Assim, visando automatizar a medida da altura do menisco (L_i) foi desenvolvido um protótipo utilizando vidro de espelho com uma das faces do diedro como eletrodo, pois o material do espelho é condutor de eletricidade, e uma eletrônica de sensor de umidade por capacitância elétrica (Rabello et al., 2005). A Figura 4 apresenta a placa de espelho com 2 eletrodos (a), a montagem do diedro (b) e o circuito eletrônico desenvolvido (c). O protótipo foi testado na câmara de sucção (Fig. 3), aplicando-se potenciais e medindo-se L_i e a voltagem no sensor capacitivo (mV) com um multímetro. O espaçador utilizado para a separação das placas e formação do ângulo de diedro foi de 100 μm .

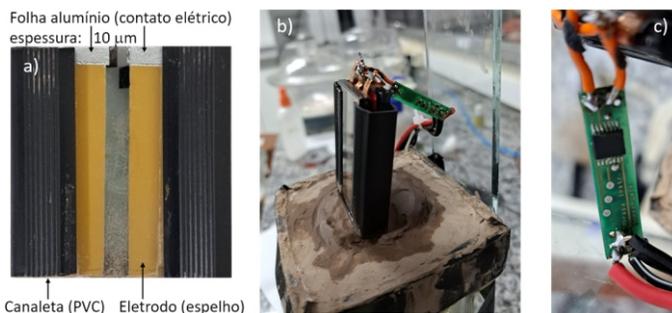


Figura 4. Vidro de espelho com eletrodos (a), protótipo de sensor de diedro eletrônico (b) e detalhes do circuito eletrônico (c).

Resultados e Discussão

As respostas de 3 sensores de diedro (medida do menisco L , cm) com placa de gesso e vidro (G/V) em função da sucção aplicada (kPa) na câmara de sucção são apresentadas na Fig. 5a. A linha contínua representa a curva teórica esperada para a configuração utilizada (espaçador de $120\ \mu\text{m}$ e altura de 4 cm; Eq. 4). Observa-se um decaimento rápido de L para sucções mais baixas, até cerca de 3 kPa e uma diminuição drástica desse decaimento para sucções maiores, que é típico da equação do diedro (Eq. 4) onde L é proporcional à $1/\psi$. A raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) do potencial matricial da água medido pelo diedro foi de cerca de 1 kPa para essa configuração G/V com espaçador de $120\ \mu\text{m}$, mas verifica-se uma dispersão maior dos dados para sucções maiores que 5 kPa. Isso ocorre, pois o menisco é medido manualmente com uma escala graduada com divisão de 0,5 mm e assim, para valores de L menor que 0,5 cm o erro aumenta bastante.

Para aumentar a faixa de medida dos sensores de diedro é necessário se utilizar espaçadores menores. No entanto, nesses casos a confecção de sensores de diedro com espaçadores menores que $100\ \mu\text{m}$ exige um cuidado ainda maior com a limpeza da superfície do vidro e os processos de colagem. A seguir são apresentados resultados de alguns sensores de diedro de 2 placas de vidro com espaçadores de $160\ \mu\text{m}$ (V/V-1), $100\ \mu\text{m}$ (V/V-2) e $50\ \mu\text{m}$ (V/V-3) (Figura 6). Verifica-se um comportamento similar ao obtido com o diedro de placa de gesso (Fig. 5) onde ocorre maior dispersão da medida para valores de L menores que 0,5 cm. Os valores de RMSE obtidos foram 1 kPa, 2,5 kPa e 4,1 kPa para os sensores com espaçadores de 160, 100 e $50\ \mu\text{m}$, respectivamente. Com esses sensores foi possível se realizar medidas do potencial matricial da água até cerca de 15 kPa, 30 kPa e 50 kPa para os diedros de 160, 100 e $50\ \mu\text{m}$, respectivamente.

Nas medidas apresentadas anteriormente (Fig. 5 e 6) os sensores foram posicionados diretamente no material poroso da câmara de sucção (Fig. 3). No caso da determinação de ψ no solo a medida pode representar uma camada muito superficial do solo quando colocado na superfície, devido ao gradiente de potencial criado na evaporação. Para realizar medidas em profundidade foi desenvolvido um dispositivo composto de uma haste porosa (gesso) isolado por um material plástico e com a sua extremidade sem isolamento e que ficará em contato com o solo (Fig. 7). O sensor diédrico propriamente dito (V/V-3, com espaçador de $50\ \mu\text{m}$ e altura de 4,5 cm) foi conectado com gesso na extremidade superior da haste, ficando a um ângulo aproximado de 60° para facilitar a medida da altura do menisco L . Esse dispositivo foi testado em um experimento com uma caixa de solo LVA_d (Latosolo Vermelho Amarelo distrófico), juntamente com tensiômetros de cápsula porosa para comparação (Fig. 7). O solo foi inicialmente saturado e as medidas do diedro e tensiômetro foram anotadas diariamente durante a evaporação do solo por cerca de 20 dias, onde o solo foi novamente saturado e realizado mais um ciclo completo de

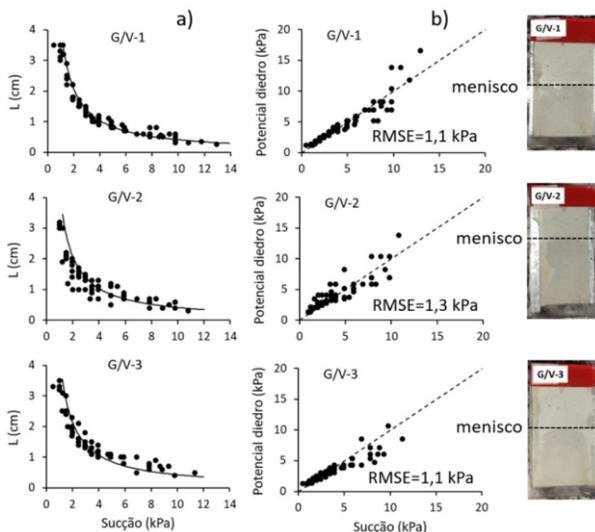


Figura 5. Resposta de 3 sensores de diedro de placa de vidro e gesso retificado (G/V1, 2 e 3) com espaçador de $120 \mu\text{m}$ e altura de 4 cm (a) e o potencial da água no solo medido pelo diedro em função da sucção aplicada (b).

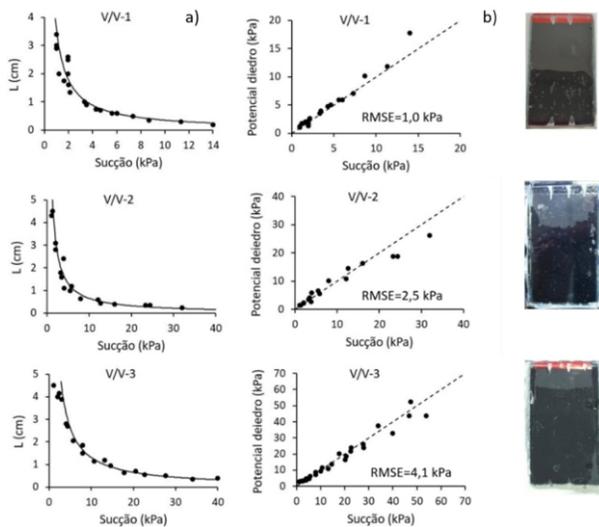


Figura 6. Resposta de 3 sensores de diedro de 2 placas de vidro (a) com espaçador de $160 \mu\text{m}$ e altura de 4 cm (V/V-1), espaçador de $100 \mu\text{m}$ e altura de 4,5 cm (V/V-2), espaçador de $50 \mu\text{m}$ e altura de 4,5 cm (V/V-3), e o potencial da água no solo medido pelo diedro em função da sucção aplicada (b).

Os resultados comparativos do diedro e tensiômetro são apresentados na Fig. 8b. Foram utilizados 3 tensiômetros (com manômetro de mercúrio, tensiômetro de agulha e manômetro tipo Bourdon), mas o que apresentou resultados mais consistentes foi o com manômetro de Hg, sendo, portanto, selecionado como referência para comparação com o sensor de diedro. Os resultados da variação da altura do menisco e dos potenciais da água medidos pelo sensor de diedro e tensiômetro de Hg estão na Fig. 8. O RMSE da medida do diedro, considerando o tensiômetro como referência, foi de 2 kPa.

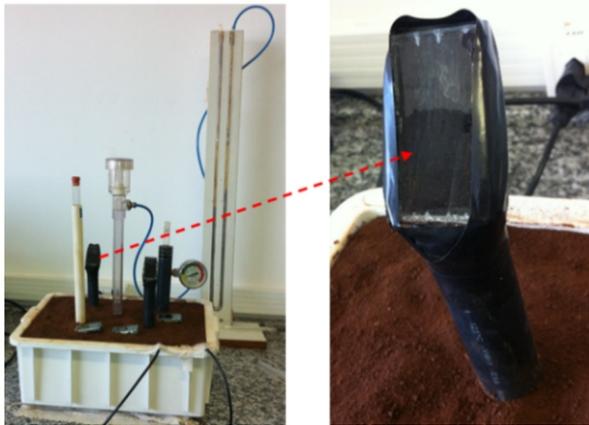


Figura 7. Experimento para acompanhamento do potencial da água no solo medido pelo sensor de diedro e tensiômetros.

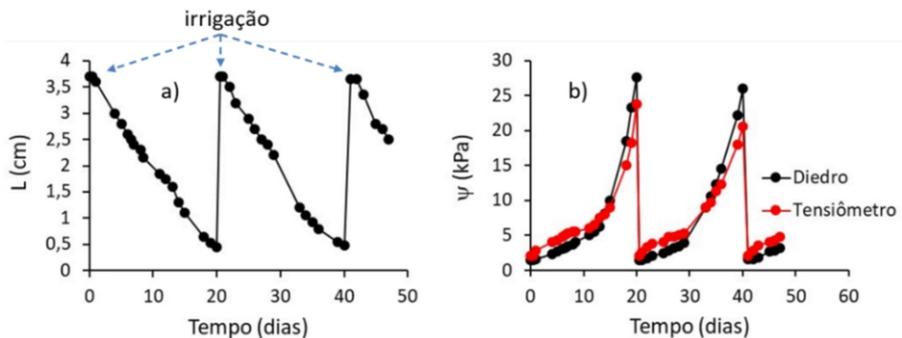


Figura 8. Resposta do sensor de diedro no experimento da Fig. 6: a) altura do menisco (L) em função do tempo de evaporação; b) Potencial da água no solo (ψ) em função do tempo.

O protótipo de sensor de diedro construído com a eletrônica de um sensor por capacitância elétrica (Rabello et al., 2005) foi testado em uma câmara de sucção (Fig. 3) apresentando a resposta mostrada na Figura 9, com os dados

ajustados por uma função tipo potência. Observa-se uma queda rápida da voltagem quando o solo seca e o menisco diminui de 4,75 cm (altura máxima do menisco, em função da altura da placa de vidro) para cerca de 4 cm, e uma queda lenta em mV entre 4 e 1 cm de altura do menisco. Isso ocorre devido à redução drástica do volume de água entre as placas em função da altura do menisco, causando uma diminuição rápida da capacitância elétrica do meio.

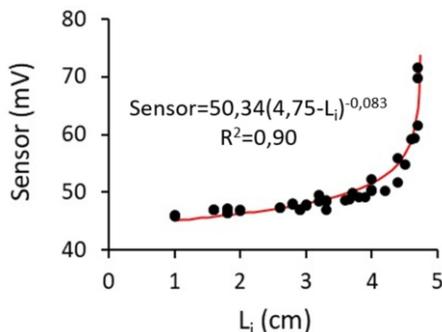


Figura 9. Resposta do sensor de diedro eletrônico (mV) em função da altura do menisco (L_i , cm).

Conclusões

Este trabalho apresenta o princípio de funcionamento do sensor de diedro para a determinação do potencial matricial da água no solo, recomendações para a sua construção e teste, e alguns protótipos com operação manual e um protótipo automático utilizando um sensor de capacitância elétrica.

Os sensores construídos com uma placa de vidro e a outra de gesso retificado apresentaram erros de medida de cerca de 1 kPa com faixa de operação entre 0 e aproximadamente 15 kPa. Para faixas maiores utilizou-se 2 placas de vidro e espaçadores de 160, 100 e 50 μm , possibilitando medidas de até 15, 30 e 55 kPa, respectivamente.

O experimento realizado comprando o sensor de diedro com um tensiômetro de cápsula porosa, em um solo LVAd, com 2 ciclos de evaporação, por um período de 40 dias, mostrou excelente correlação e um erro de medida, expresso pela raiz quadrada do erro quadrático médio, de 2 kPa, com potenciais matriciais variando entre 1 e 25 kPa.

O protótipo desenvolvido com detecção automática do menisco por capacitância elétrica mostrou uma resposta não linear (função tipo potência) similar à observada na relação de L com ψ , com potencial de desenvolvimento de um produto para uso no controle da irrigação e outras aplicações na área agrícola e ambiental.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fapesp (proc. 2020/16179-3) e Embrapa (proc. 10.22.00.201.00.00) pelo apoio financeiro para execução deste trabalho.

Referências

- BERTHIER, J.; SILBERZAN, P. **Microfluidics for biotechnology**. 2nd Edition. Artech House Integrated Microsystems Series, Second Edition, Artech House, 2010, 512p
- CALBO A. G. **Dihedral sensor for determining tension, potential and activity of liquids. Brazilian Agricultural Research Corporation**. Patent number: WO 2011/079367 A1, 2011
- RABELLO, L. M.; VAZ, C. M. P.; TORRE-NETO, A. **Sensor capacitivo para sondagem da umidade no perfil de solo**. Comunicado Técnico 71, Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP, 2005, 2p.
- VAZ, C. M. P.; CALBO, A. G.; PORTO, L. F.; PORTO, L. H. Principles and applications of a new class of soil water matric potential sensors: the dihedral tensiometer. **Procedia Environmental Sciences**, 19:484-493, 2013

Embrapa

Instrumentação



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA E
PECUÁRIA

