

DESEMPENHO DE SISTEMAS DE LEITURA DE TENSÍÔMETRO EM CONDIÇÕES DE TEMPERATURA CONTROLADA

JOSIMAR DE AZEVEDO¹; ALCIONE GUIMARÃES FREIRE¹; THIAGO LEITE DE ALENCAR¹; CARLOS LEVI ANASTÁCIO DOS SANTOS¹; RAIMUNDO NONATO DE ASSIS JÚNIOR¹; FRANCISCO MARCUS LIMA BEZERRA² E JAEDSON CLÁUDIO ANUNCIATO MOTA¹

**Artigo extraído da dissertação do primeiro autor.*

¹ Departamento de Ciências do Solo, Universidade Federal do Ceará, UFC, Av. Mister Hull, 2977, 60.021-970, Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: eng.azevedofmi@hotmail.com; alcionegef@hotmail.com;

thiagoleitealencar@yahoo.com.br; carloslevi@hotmail.com; assisjr@ufc.br; jaedson.mota@ufc.br.

² Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, UFC, Av. Mister Hull, 2977, 60.021-970, Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: mbezerra@ufc.br.

1 RESUMO

Objetivou-se aferir sistemas alternativos ao vacuômetro de mercúrio para a quantificação do potencial mátrico da água no solo, definir o tempo para reestabelecer o equilíbrio entre as tensões da água no interior do tensiômetro e no solo após a inserção da agulha do tensiômetro no tensiômetro, e quantificar erros na determinação do potencial mátrico e da umidade a partir dos sistemas alternativos. O ensaio foi realizado em vasos, em laboratório, com três tensiômetros por vaso, seis repetições, nas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m. Definido o tempo de equilíbrio comparou-se o potencial mátrico e a umidade volumétrica nos três sistemas de leitura. Concluiu-se que a leitura do tensiômetro pode ser realizada em quaisquer dos tempos desde 30 a 180 segundos; o tensiômetro substitui o vacuômetro de mercúrio desde a saturação até a capacidade de campo, e o vacuômetro de Bourdon da condição na ou próxima à capacidade de campo até a situação mais seca; e os erros decorrentes dos sistemas alternativos se refletiram na estimativa da umidade do solo, com subestimativa dos valores a partir da capacidade de campo.

Palavras-chave: Potencial mátrico, água no solo, irrigação.

AZEVEDO, J.; FREIRE, A. G.; ALENCAR, T. L.; SANTOS, C. L. A.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; BEZERRA, F. M. L.; MOTA, J. C. A.

PERFORMANCE OF TENSIO METER READING SYSTEMS UNDER CONTROLLED TEMPERATURE CONDITIONS

2 ABSTRACT

The study aimed at assessing alternative systems to the mercury vacuum for quantification of water matric potential, to define the time for restoring the equilibrium between the water tension in the interior of the tensiometer, and in the soil after the insertion of the needle in the tensiometer, and to quantify errors in the determination of the water matric potential and the soil moisture from the alternative systems. The essay was carried out in pots in the laboratory.

Recebido em 11/04/2017 e aprovado para publicação em 30/09/2017

DOI: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2017v22n4p735-756>

Three tensiometers were installed per pot, six replications, at depths of 0.20, 0.35 and 0.50 m. After the definition of the equilibration time, the matric potential and volumetric moisture were compared in the three systems. It was concluded that after the insertion of the needle of the tensiometer the reading can be performed in any of the times from 30 to 180 seconds; The tensiometer replaces the mercury vacuum gauge from saturation to field capacity and the Bourdon vacuum gauge from the condition at or near the field capacity to the driest condition; and the errors resulting from alternative systems were reflected in the estimation of the soil moisture whereas the alternative systems underestimated the values from the field capacity.

Keywords: Matric potential, soil water, irrigation.

3 INTRODUÇÃO

O solo e a água são recursos essenciais para o desenvolvimento da agricultura e, portanto, é de fundamental importância saber explorá-los com eficácia. Neste contexto, o conhecimento da dinâmica da água no solo é necessário para maximizar seu uso, especialmente por se tratar de um recurso que tornar-se-á escasso no tempo (MARTINS, 2009; BRAGA; CALGARO, 2010).

Manejar corretamente a irrigação, em momento oportuno e em quantidade suficiente para atender às necessidades hídricas das culturas, tem-se tornado essencial para obtenção de elevadas produtividades com economia de água e energia (BONOMO et al., 2013). Neste cenário, diversos equipamentos como sonda FDR, sonda TDRs, sonda de nêutrons e tensiômetro, têm sido utilizados para o monitoramento da umidade ou da energia com que a água se encontra no solo, servindo como ferramenta no manejo da irrigação. Dentre eles, o tensiômetro é um equipamento prático, de baixo custo, além de ser o mais sensível e exato para a determinação do potencial mátrico da água no solo *in situ* (KANDELOUS; MORADI; HOPMANS, 2015; MONTESANO et al., 2015).

Com relação ao tipo de vacuômetro de leitura do tensiômetro – mercúrio, vacuômetro de Bourdon, transdutor de pressão, câmara de ar – os erros sistemáticos inerentes a cada sistema de leitura são propagados em maior ou menor intensidade nas estimativas de outras variáveis no solo que dependem do conhecimento do potencial mátrico, por exemplo, a umidade do solo, a difusividade hidráulica e o gradiente de potencial total (BRITO et al., 2014).

Os tensiômetros com vacuômetro de mercúrio são considerados mais sensíveis e exatos, o que faz com que o mesmo seja tomado como padrão para aferição dos demais modelos. No entanto, uma das justificativas pela sua substituição por outros modelos é que a utilização do mercúrio como líquido manométrico tem sido vista como um problema para quem manuseia, podendo causar danos à sua saúde, e também por essa substância apresentar risco de poluição ambiental em caso de manuseio inadequado (MORAES et al., 2006; BRAGA; CALGARO, 2010; BERALDO; CORÁ; FERNANDES, 2012).

Considerando a possibilidade de que o uso do mercúrio será proibido em vários países, inclusive no Brasil, nesta pesquisa foram testadas as hipóteses de que: 1) outros sistemas de leitura do tensiômetro, embora com princípios de funcionamento distintos, substituem o vacuômetro de mercúrio na determinação do potencial matricial da água no solo; 2) no tensiômetro em que se utiliza o tensiômetro digital com transdutor de pressão, dada a perturbação causada ao tensiômetro quando da inserção da agulha, requer-se um decurso de tempo para que seja reestabelecido o equilíbrio entre as tensões da água no interior do tensiômetro e no solo; e 3) outros sistemas de leitura para a medição do potencial mátrico da água no solo, ainda que

em condições controladas, produzem erros em relação ao vacuômetro de mercúrio afetando a estimativa da umidade do solo.

Objetivou-se aferir dois sistemas alternativos ao vacuômetro de mercúrio para a quantificação do potencial mátrico da água no solo, definir o tempo para que se reestabeleça o equilíbrio entre as tensões da água no interior do tensiômetro e no solo, bem como quantificar os erros envolvidos na determinação do potencial mátrico e da umidade a partir dos dois sistemas alternativos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Procedimento Experimental

O solo utilizado no experimento foi classificado como Argissolo Amarelo (EMBRAPA, 2013), cujos teores de areia, silte e argila estão apresentados na Tabela 1, localizado no campus do Pici, na Universidade Federal do Ceará, em Fortaleza, Ceará. Os vasos com diâmetro médio de 0,38 m e profundidade de 0,65 m, e com o fundo perfurado para permitir a drenagem, foram reproduzidos com adaptações às condições de contorno do método do perfil instantâneo (HILLEL; KRENTOS; STYLIANOU, 1972).

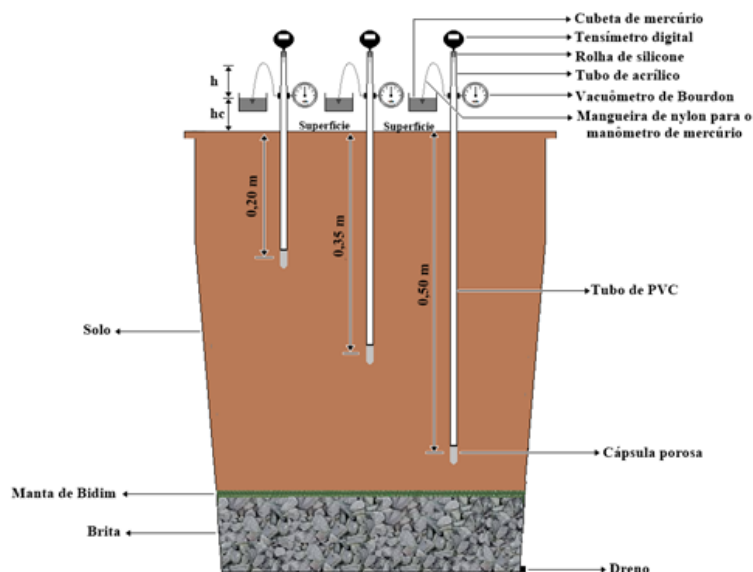
Tabela 1. Análise granulométrica do solo, consideradas as profundidades em campo

Profundidade	Granulometria			Classe textural
	Areia	Silte	Argila	
--- m ---	----- g kg ⁻¹ -----			
0,15	873	40	87	Areia
0,25	843	75	82	Areia franca
0,50	585	75	340	Franco-argilo-arenosa

As amostras de solo coletadas com estrutura não preservada foram utilizadas para a realização da análise granulométrica, sendo a argila determinada pelo método da pipeta, a areia por tamisação, e o silte por diferença a partir das frações argila e areia (GEE; BAUDER, 1986) e de densidade de partículas (BLAKE; HARTGE, 1986b). Já as amostras com estrutura preservada, coletadas em anel volumétrico ao final do ensaio nos vasos na profundidade de 0,25-0,30 m e de 0,40-0,45 m, foram utilizadas para a construção da curva de retenção de água no solo (KLUTE, 1986) e determinação da densidade do solo (BLAKE; HARTGE, 1986a). A classificação textural foi feita pelo triângulo textural de Santos et al. (2013).

Os tensiômetros foram avaliados quanto aos seus sistemas de leitura em ensaio no laboratório, em seis vasos (seis repetições) contendo solo correspondente à terra fina seca ao ar (TFSA). Em cada vaso foram instalados três tensiômetros nas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m (Figura 1). No fundo dos vasos em que os tensiômetros foram instalados foi colocada uma camada de brita para facilitar a drenagem da água e, acima dela, uma manta de bidim para evitar perda de solo. Na sequência, o solo foi colocado no vaso e acomodado com leves batidas com marreta de borracha para evitar bolsões de espaços vazios, mantendo-se então a mesma disposição das classes texturais verificadas em campo para aquele solo. Em seguida, foram instalados os tensiômetros com suas cápsulas porosas nas profundidades citadas anteriormente.

Figura 1. Ilustração da distribuição no vaso dos tensiômetros construídos com os três sistemas de leitura



O solo foi saturado por capilaridade, de baixo para cima para evitar bolsões de ar, com a utilização de uma mangueira ligada a uma torneira contendo água. Atingida a saturação, fez-se a cobertura da superfície do solo com lona plástica para evitar a evaporação da água (essa cobertura foi retirada quando a drenagem praticamente cessou). Após a saturação do solo, as leituras dos tensiômetros foram iniciadas sempre às 8 h, com a temperatura controlada (21 ± 1 °C).

Para evitar modificações no equilíbrio estabelecido entre a câmara de ar, a água do tensiômetro e a água no solo, a leitura dos tensiômetros foi realizada na seguinte ordem: tensiômetro com vacuômetro de mercúrio, vacuômetro de Bourdon e, por último, com o tensiômetro digital contendo o transdutor de pressão (neste se fez a inserção da agulha e a leitura foi feita em 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos após). Depois de considerada cessada a drenagem, ou seja, quando o solo atingiu a capacidade de campo (quando $d\theta/dt \leq 0,001 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$), a lona que cobria a superfície do solo no vaso foi retirada e o experimento prosseguiu com a água no solo sendo retirada por evaporação. O experimento teve duração de 127 dias, totalizando 3052 horas, com leituras realizadas em 1, 4, 8, 23, 71, 95, 119, 143, 167, 191, 263, 335, 407, 479, 551, 623, 695, 791, 887, 1007, 1175, 1343, 1511, 1708, 1876, 2044, 2212, 2380, 2548, 2716, 2884 e 3052 horas após o início do experimento.

Calculou-se o potencial mátrico dos tensiômetros com manômetro de mercúrio (ϕ_m , m) pela equação 1.

$$\phi_m = -12,6h_{Hg} + h_c + z \quad (1)$$

Em que h_{Hg} é a altura da coluna de Hg, m; h_c a altura do nível de Hg na cubeta em relação à superfície do solo, m; e z a distância entre o centro da cápsula e a superfície do solo, m.

Com o vacuômetro de Bourdon (escala de 20 mm de Hg) as leituras foram realizadas no visor do instrumento. O potencial mátrico da água no solo (ϕ_m , m) foi calculado pela equação 2 (BRITO et al., 2009).

$$\phi_m = -(0,0136L) - h + h_m + z \quad (2)$$

Em que L é a leitura no visor analógico, mmHg; h a altura da coluna de água acima do ponto de inserção do vacuômetro, m; h_m ($= h_c$) a altura de inserção do vacuômetro de Bourdon no tubo de PVC em relação à superfície do solo, m.

No tensímetro, os dados foram coletados após conectar o sensor a câmara de ar através de uma agulha, promovendo-se assim a tensão para o tensímetro. O potencial mátrico da água no solo (ϕ_m , m) foi calculado pela equação 3.

$$\phi_m = -(0,0136L) + h_a + z \quad (3)$$

Em que L é a leitura no visor digital, mmHg; $h_a = h_c + h$, m.

Considerando outros cálculos de água no solo quando conhecidos os potenciais mátricos obtidos por cada tipo de tensiômetro, foi possível conhecer também os respectivos conteúdos de água à base de volume a partir da curva de retenção de água no solo. A partir da relação potencial mátrico versus conteúdo de água, foi possível avaliar o erro de medição na determinação da umidade do solo.

A curva de retenção de água no solo para as profundidades de 0,25-0,30 m e de 0,40-0,45 m correspondeu à média de seis curvas para cada profundidade. Coletou-se uma amostra em cada vaso por profundidade, empregando um amostrador de solo tipo Uhland para manter a estrutura preservada, em cilindros com altura e diâmetro, ambos medindo 0,05 m. Para os tensiômetros instalados em 0,20 e 0,35 m, utilizou-se a curva obtida para a profundidade de 0,25-0,30 m ($\theta_s = 0,399 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; $\theta_r = 0,048 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; $\alpha = 0,018$; $m = 33,862$; $n = 1,825$). Para os tensiômetros instalados em 0,50 m, utilizou-se a curva obtida para a profundidade de 0,40-0,45 m ($\theta_s = 0,397 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; $\theta_r = 0,050 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; $\alpha = 0,018$; $m = 25,452$; $n = 1,671$). No procedimento, o conteúdo de água na saturação foi considerado igual à porosidade total do solo (calculada com os valores de densidade do solo e de partículas pela equação 4).

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \right) \quad (4)$$

Sendo α a porosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), ρ_s e ρ_p a densidade do solo e densidade de partículas (kg m^{-3}), respectivamente. Para os pontos de baixas tensões (2; 4; 6; 8 e 10 kPa), os respectivos conteúdos de água foram determinados mediante o uso de placa cerâmica porosa. Para os demais pontos (33, 100 e 1500 kPa), utilizou-se a câmara de Richards (KLUTE, 1986). Após a obtenção da umidade do solo para todos os pontos de tensão, ajustou-se os dados por meio do modelo de van Genuchten (1980), a partir da equação 5.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\phi_m|)^n]^m} \quad (5)$$

Em que θ é a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_r e θ_s são, respectivamente, as umidades residual e de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), ϕ_m o potencial mátrico (kPa), α (escalador do ϕ_m); m e n são parâmetros do modelo.

Os dados foram ajustados pelo software Table Curve 2D, versão 5.01 (TABLE CURVE 2D, 2014). As variáveis θ_s e θ_r foram fixadas com valores, respectivamente, de umidade correspondente à saturação e tensão de 1500 kPa, ambos medidos em laboratório. O ajuste dos parâmetros α , m e n foi realizado pelo método iterativo de Newton-Raphson, sem dependência do parâmetro m com o n (DOURADO NETO et al., 2000).

4.2 Análise dos dados

Para a determinação do tempo em que se estabeleceu o equilíbrio entre as tensões da água no interior do tensiômetro e a da água no solo, consideraram-se as leituras em 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos após a introdução da agulha no tensiômetro. Foram testados, por meio do teste t de Student a 10 % de significância, os coeficientes angulares e lineares das equações das retas que relacionam os valores de potencial mátrico em cada tempo de leitura no decorrer do experimento.

Além dos coeficientes, foi realizado o teste de paralelismo a fim de identificar a dependência do potencial mátrico em função do tempo, como também o teste do coeficiente de correlação linear. Quanto mais próximo de zero, menor a correlação. O coeficiente de correlação foi estimado com base na equação 6.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (6)$$

Em que E_i e O_i referem-se aos valores obtidos com os sistemas alternativos e referência, respectivamente, \bar{E} e \bar{O} são as médias dos valores obtidos com os sistemas alternativos e de referência, respectivamente.

Após a definição do tempo de equilíbrio para o tensímetro digital, comparou-se o potencial mátrico e a umidade volumétrica para os três sistemas de leitura do tensiômetro (vacuômetro de Hg, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital). Os sistemas de leitura alternativos foram relacionados graficamente com o sistema de referência, com os coeficientes angulares e lineares da equação da reta que os relaciona avaliados pelo teste t de Student a 10 % de significância. Da mesma forma como foi feito para o tensímetro, aplicaram-se os testes de paralelismo de retas e do coeficiente de correlação linear.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quando se analisa o tempo de equilíbrio do potencial mátrico utilizando o tensímetro digital com transdutor de pressão com os tempos de leitura (Figura 2), após a inserção da agulha do tensímetro no tensiômetro em todas as profundidades 0,20, 0,35 e 0,50 m, observa-se que em todos os tempos desde 1 a 1511 horas e de 1708 a 3052 horas (total de 127 dias) quando as leituras não mais variavam, apresentaram altos coeficientes de correlação linear com o potencial mátrico (com valores sempre acima de 0,96, Tabela 2). Isto significa que a variação do

potencial matricial com o tempo apresentou comportamento linear, ou seja, a medida que este aumentava, aquele diminuía linearmente. Esse comportamento é típico de experimentos com temperatura controlada, haja visto que a transmissão de energia térmica do ar atmosférico em conjunto com a do solo pode provocar alteração na tensão da água localizada no interior do tensiômetro, como também na água do solo (BRITO et al., 2014).

Observa-se que não houve diferença significativa entre os valores dos potenciais matriciais obtidos com os tratamentos aplicados. Isso indica que a leitura do tensiômetro pode ser feita em quaisquer dos tempos analisados, 30, 60, 90, 120, 150 ou 180 segundos, sem acarretar diferença significativa do potencial matricial da água no solo. Ao contrário do que foi reportado por Marthaler et al. (1983), em que o reequilíbrio do potencial matricial da água no solo com a água contida no tensiômetro varia de 2 a 10 minutos, observou-se que esse equilíbrio foi atingido em não mais que 30 segundos, tempo mínimo necessário para garantir boa confiabilidade dos dados.

Figura 2. Relação correspondente aos tempos de equilíbrio do tensiômetro digital relacionado aos potenciais matriciais nas profundidades de 0,20 m (A e B); 0,35 m (C e D); 0,50 m (E e F)

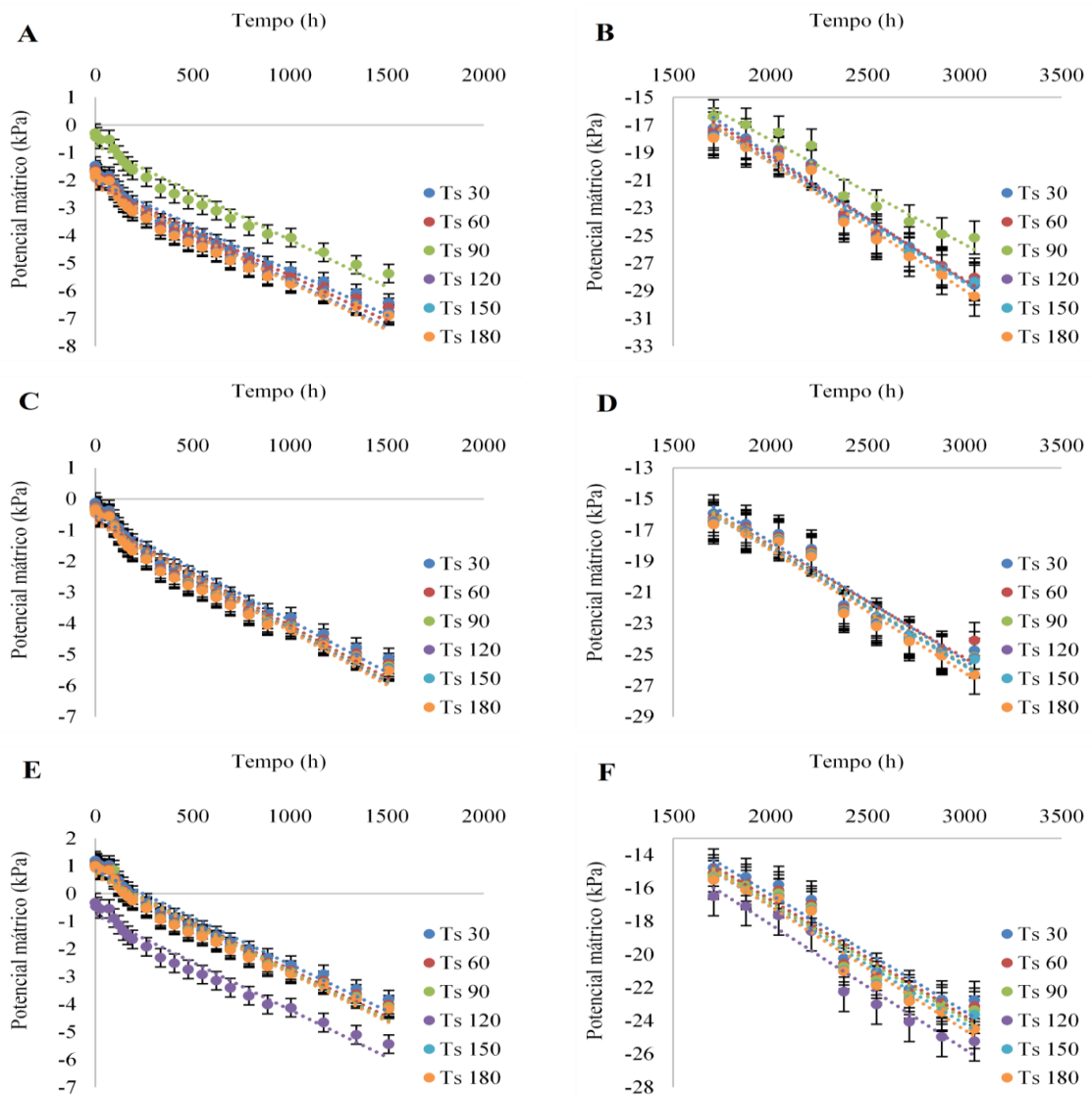


Tabela 2. Relação correspondente aos tempos de equilíbrio do tensímetro digital para os potenciais matriciais em relação aos coeficientes de correlação linear

Tempo (h)	Prof. (m)	Tempo equilíbrio (s)	Equação	r ¹	b ²
1 a 1511	0,20	30	$\hat{y} = -0,0032x - 2,0124$	0,9808**	$\neq 0^{**}$
		60	$\hat{y} = -0,0033x - 2,1463$	0,9797**	$\neq 0^{**}$
		90	$\hat{y} = -0,0034x - 0,7381$	0,9819**	$\neq 0^{**}$
		120	$\hat{y} = -0,0034x - 2,2179$	0,9803**	$\neq 0^{**}$
		150	$\hat{y} = -0,0034x - 2,2252$	0,9805**	$\neq 0^{**}$
		180	$\hat{y} = -0,0035x - 2,2308$	0,9807**	$\neq 0^{**}$
	0,35	30	$\hat{y} = -0,0033x - 0,5638$	0,9821**	$\neq 0^{**}$
		60	$\hat{y} = -0,0034x - 0,6855$	0,9819**	$\neq 0^{**}$
		90	$\hat{y} = -0,0034x - 0,7381$	0,9819**	$\neq 0^{**}$
		120	$\hat{y} = -0,0034x - 0,7585$	0,9825**	$\neq 0^{**}$
		150	$\hat{y} = -0,0035x - 0,7687$	0,9829**	$\neq 0^{**}$
		180	$\hat{y} = -0,0035x - 0,7726$	0,9831**	$\neq 0^{**}$
	0,50	30	$\hat{y} = -0,0034x + 0,8327$	0,9839**	$\neq 0^{**}$
		60	$\hat{y} = -0,0034x + 0,7084$	0,9841**	$\neq 0^{**}$
		90	$\hat{y} = -0,0035x + 0,6906$	0,9828**	$\neq 0^{**}$
		120	$\hat{y} = -0,0034x - 0,7585$	0,9825**	$\neq 0^{**}$
		150	$\hat{y} = -0,0035x + 0,6355$	0,9845**	$\neq 0^{**}$
		180	$\hat{y} = -0,0035x + 0,6340$	0,9846**	$\neq 0^{**}$
1708 a 3052	0,20	30	$\hat{y} = -0,0092x - 0,7474$	0,9864**	$\neq 0^{**}$
		60	$\hat{y} = -0,0088x - 1,6844$	0,9824**	$\neq 0^{**}$
		90	$\hat{y} = -0,0076x - 2,9551$	0,9734**	$\neq 0^{**}$
		120	$\hat{y} = -0,0087x - 2,1502$	0,9821**	$\neq 0^{**}$
		150	$\hat{y} = -0,0087x - 2,3023$	0,9819**	$\neq 0^{**}$
		180	$\hat{y} = -0,0092x - 1,2829$	0,9851**	$\neq 0^{**}$
	0,35	30	$\hat{y} = -0,0076x - 2,4498$	0,9732**	$\neq 0^{**}$
		60	$\hat{y} = -0,0072x - 3,5029$	0,9597**	$\neq 0^{**}$
		90	$\hat{y} = -0,0076x - 2,9551$	0,9734**	$\neq 0^{**}$
		120	$\hat{y} = -0,0075x - 3,0933$	0,9731**	$\neq 0^{**}$
		150	$\hat{y} = -0,0075x - 3,2561$	0,9733**	$\neq 0^{**}$
		180	$\hat{y} = -0,0079x - 2,4989$	0,9795**	$\neq 0^{**}$
	0,50	30	$\hat{y} = -0,0071x - 2,2649$	0,9662**	$\neq 0^{**}$
		60	$\hat{y} = -0,0070x - 2,6656$	0,9674**	$\neq 0^{**}$
		90	$\hat{y} = -0,0070x - 2,8235$	0,9672**	$\neq 0^{**}$
		120	$\hat{y} = -0,0075x - 3,0933$	0,9731**	$\neq 0^{**}$
		150	$\hat{y} = -0,0071x - 2,8524$	0,9678**	$\neq 0^{**}$
		180	$\hat{y} = -0,0074x - 2,2068$	0,9756**	$\neq 0^{**}$

¹coeficiente de correlação de Pearson; ²coeficiente angular da equação linear; **: significativo a 1% de probabilidade; \neq : diferente.

Vale ressaltar que as condições experimentais do trabalho de Marthaler et al. (1983), em campo, eram distintas da definida para esta pesquisa e, portanto, outras variáveis do ambiente (temperatura, pressão do vapor de água etc.) devem ter provocado diferenças no tempo de equilíbrio. Warrick et al. (1998) observaram que diminuição do potencial matricial durante as

horas mais quentes do dia é influenciada pela sensibilidade dos sensores de pressão à temperatura, ao processo de redistribuição de água no solo e à expansão de ar dentro do tensiômetro com o aumento da temperatura. Bakker et al. (2007) verificaram picos nos valores de potencial mátrico quando houveram mudanças abruptas de temperatura, ao avaliarem tensiômetro construído à base de polímero, com ampla faixa de funcionamento. Segundo os autores, embora os problemas maiores sejam em campo, o comportamento do potencial matricial frente às mudanças bruscas de temperatura ainda não foi estudado em condições de laboratório.

Apesar de após a inserção da agulha ter sido possível a observação de variação das leituras no visor do instrumento, esta variação não foi suficiente para causar diferença nos cálculos de potencial matricial, fato constatado por testes de intercepto e inclinação (Tabelas 3 e 4). As retas que relacionam o potencial matricial com o tempo apresentaram, em sua maioria, mesmo intercepto e inclinação em todas as profundidades e tempos de leitura (com exceção da profundidade de 0,20 m, em que em alguns momentos de 1 até 1511 horas o intercepto foi diferente e, de 1708 a 3052 horas, houve diferença na inclinação, ambas envolvendo o tempo de 90 segundos). Porém, mesmo com as situações isoladas citadas anteriormente, para a maioria dos casos são classificadas como paralelas, sendo, portanto, indicado o uso das equações a elas associadas para representar a regressão entre as variáveis.

Tabela 3. Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear do potencial matricial entre os tempos de leitura do tensímetro no período experimental (1 a 1511 h).

Tempo (h)	Prof. (m)	Tempos de leitura	Intercepto		Inclinação	
			t observado	t tabelado (10%)	t observado	t tabelado (10%)
1 a 1511	0,20	Ts 30 - Ts 60	0,312	1,679	0,491	1,679
		Ts 30 - Ts 90	2,968	1,679	0,993	1,679
		Ts 30 - Ts 120	0,479	1,679	0,973	1,679
		Ts 30 - Ts 150	0,496	1,679	0,970	1,679
		Ts 30 - Ts 180	0,509	1,679	0,135	1,679
		Ts 60 - Ts 90	3,280	1,679	0,487	1,679
		Ts 60 - Ts 120	0,167	1,679	0,478	1,679
		Ts 60 - Ts 150	0,184	1,679	0,476	1,679
		Ts 60 - Ts 180	0,197	1,679	0,090	1,679
		Ts 90 - Ts 120	3,447	1,679	0,000	1,679
		Ts 90 - Ts 150	3,464	1,679	0,000	1,679
		Ts 90 - Ts 180	3,477	1,679	0,045	1,679
	Ts 120 - Ts 150	0,017	1,679	0,000	1,679	
	Ts 120 - Ts 180	0,030	1,679	0,045	1,679	
	Ts 150 - Ts 180	0,013	1,679	0,045	1,679	
	0,35	Ts 30 - Ts 60	0,283	1,679	0,501	1,679
		Ts 30 - Ts 90	0,406	1,679	0,499	1,679
		Ts 30 - Ts 120	0,453	1,679	0,501	1,679
		Ts 30 - Ts 150	0,477	1,679	1,004	1,679
		Ts 30 - Ts 180	0,486	1,679	1,006	1,679
		Ts 60 - Ts 90	0,123	1,679	0,000	1,679
		Ts 60 - Ts 120	0,170	1,679	0,000	1,679
		Ts 60 - Ts 150	0,194	1,679	0,497	1,679
		Ts 60 - Ts 180	0,203	1,679	0,498	1,679
		Ts 90 - Ts 120	0,048	1,679	0,000	1,679
		Ts 90 - Ts 150	0,071	1,679	0,495	1,679
		Ts 90 - Ts 180	0,080	1,679	0,496	1,679
	Ts 120 - Ts 150	0,024	1,679	0,497	1,679	
	Ts 120 - Ts 180	0,033	1,679	0,499	1,679	
	Ts 150 - Ts 180	0,009	1,679	0,000	1,679	
	0,50	Ts 30 - Ts 60	0,290	1,679	0,000	1,679
		Ts 30 - Ts 90	0,331	1,679	0,101	1,679
		Ts 30 - Ts 120	0,173	1,679	0,000	1,679
		Ts 30 - Ts 150	0,459	1,679	0,103	1,679
		Ts 30 - Ts 180	0,463	1,679	0,103	1,679
		Ts 60 - Ts 90	0,041	1,679	0,101	1,679
Ts 60 - Ts 120		0,117	1,679	0,000	1,679	
Ts 60 - Ts 150		0,170	1,679	0,103	1,679	
Ts 60 - Ts 180		0,173	1,679	0,102	1,679	
Ts 90 - Ts 120		0,158	1,679	0,137	1,679	
Ts 90 - Ts 150		0,128	1,679	0,000	1,679	
Ts 90 - Ts 180		0,132	1,679	0,000	1,679	
Ts 120 - Ts 150	0,286	1,679	0,142	1,679		
Ts 120 - Ts 180	0,290	1,679	0,141	1,679		
Ts 150 - Ts 180	0,003	1,679	0,000	1,679		

Tabela 4. Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear do potencial matricial entre os tempos de leitura do tensímetro no período experimental (1708 a 3052 h)

Tempo (h)	Prof. (m)	Tempos de leitura	Intercepto		Inclinação		
			t observado	t tabelado (10%)	t observado	t tabelado (10%)	
1708 a 3052	0,20	Ts 30 - Ts 60	0,356	1,740	0,450	1,740	
		Ts 30 - Ts 90	0,840	1,740	1,744	1,740	
		Ts 30 - Ts 120	0,534	1,740	0,565	1,740	
		Ts 30 - Ts 150	0,591	1,740	0,564	1,740	
		Ts 30 - Ts 180	0,204	1,740	0,000	1,740	
		Ts 60 - Ts 90	0,483	1,740	1,288	1,740	
		Ts 60 - Ts 120	0,177	1,740	0,111	1,740	
		Ts 60 - Ts 150	0,235	1,740	0,111	1,740	
		Ts 60 - Ts 180	0,153	1,740	0,452	1,740	
		Ts 90 - Ts 120	0,306	1,740	1,185	1,740	
		Ts 90 - Ts 150	0,248	1,740	1,185	1,740	
		Ts 90 - Ts 180	0,636	1,740	1,751	1,740	
		Ts 120 - Ts 150	0,058	1,740	0,000	1,740	
		Ts 120 - Ts 180	0,330	1,740	0,567	1,740	
		Ts 150 - Ts 180	0,388	1,740	0,567	1,740	
		0,35	Ts 30 - Ts 60	0,401	1,740	0,378	1,740
			Ts 30 - Ts 90	0,192	1,740	0,415	1,740
			Ts 30 - Ts 120	0,245	1,740	0,031	1,740
	Ts 30 - Ts 150		0,307	1,740	0,104	1,740	
	Ts 30 - Ts 180		0,019	1,740	0,326	1,740	
	Ts 60 - Ts 90		0,208	1,740	0,000	1,740	
	Ts 60 - Ts 120		0,156	1,740	0,352	1,740	
	Ts 60 - Ts 150		0,094	1,740	0,287	1,740	
	Ts 60 - Ts 180		0,382	1,740	0,692	1,740	
	Ts 90 - Ts 120		0,053	1,740	0,386	1,740	
	Ts 90 - Ts 150		0,114	1,740	0,315	1,740	
	Ts 90 - Ts 180		0,174	1,740	0,766	1,740	
	Ts 120 - Ts 150		0,062	1,740	0,074	1,740	
	Ts 120 - Ts 180		0,226	1,740	0,361	1,740	
	Ts 150 - Ts 180		0,288	1,740	0,441	1,740	
	0,50		Ts 30 - Ts 60	0,152	1,740	0,047	1,740
			Ts 30 - Ts 90	0,212	1,740	0,047	1,740
			Ts 30 - Ts 120	0,315	1,740	0,238	1,740
		Ts 30 - Ts 150	0,223	1,740	0,049	1,740	
		Ts 30 - Ts 180	0,022	1,740	0,144	1,740	
		Ts 60 - Ts 90	0,060	1,740	0,000	1,740	
Ts 60 - Ts 120		0,163	1,740	0,311	1,740		
Ts 60 - Ts 150		0,071	1,740	0,000	1,740		
Ts 60 - Ts 180		0,175	1,740	0,197	1,740		
Ts 90 - Ts 120		0,103	1,740	0,312	1,740		
Ts 90 - Ts 150		0,011	1,740	0,000	1,740		
Ts 90 - Ts 180		0,235	1,740	0,197	1,740		
Ts 120 - Ts 150		0,092	1,740	0,331	1,740		
Ts 120 - Ts 180		0,337	1,740	0,064	1,740		
Ts 150 - Ts 180		0,246	1,740	0,204	1,740		

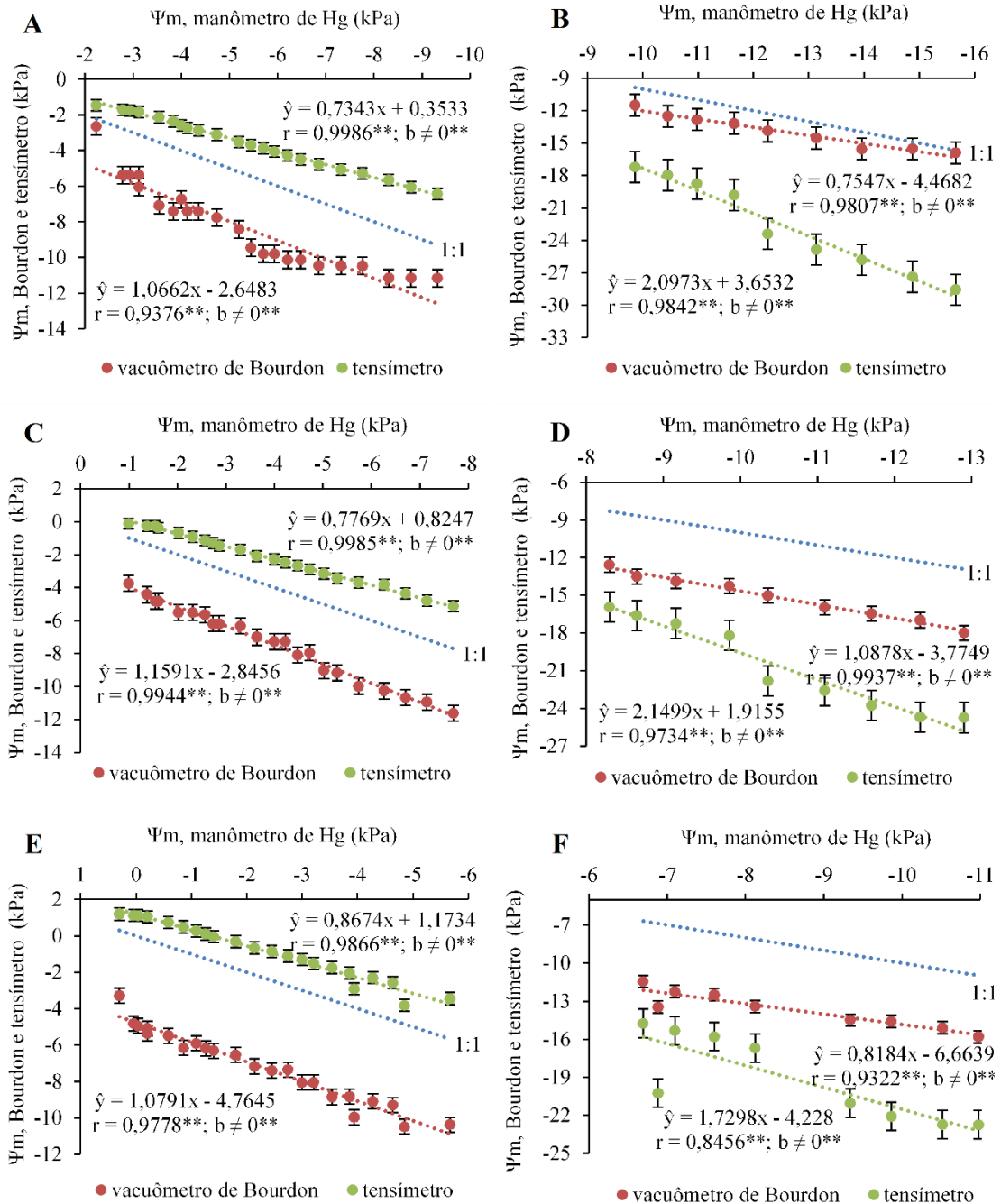
Quanto à variação do potencial matricial entre os sistemas de leitura, observa-se que os valores de potencial mátrico durante os dias de avaliação diminuíram com o decorrer do tempo, com variação uniforme e semelhante entre as três profundidades monitoradas de 0,20, 0,35 e 0,50 m (Figura 3). Considerando as texturas de solo nas distintas profundidades, de fato a umidade a que se chegou ao final do experimento foi inferior à da capacidade de campo, configurando uma situação semelhante à que se busca em cultivos irrigados, quando se monitora a umidade para que ela fique na ou próxima à capacidade de campo.

Ainda na Figura 3, o tensímetro digital apresentou alto coeficiente de correlação ($r = 0,99$) para as profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m correspondente à parte úmida (1 a 1511 horas) em condição próxima a 1 atm. Quando o solo encontrava-se mais seco, os valores foram 0,98, 0,97 e 0,85 nas respectivas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m. Na fase final do experimento (1708 a 3052 horas) os coeficientes de correlação apresentaram valores menores, evidenciando redução da dependência entre as variáveis. De acordo com Lemon (1956), o processo de evaporação de um solo com alta umidade e sem vegetação passa por três estádios distintos sendo que no terceiro estágio, o movimento da água no solo é bastante lento, decorrente de forças de adsorção entre a água e as partículas do solo além da condutividade hidráulica ser muito baixa. Nestas condições, por serem as colunas de solo estratificadas, com camada superficial mais arenosa que a camada mais profunda, é provável que os valores de potencial matricial, umidade e, conseqüentemente, condutividade hidráulica sejam distintos em profundidade e no decorrer do tempo.

Já para o Bourdon houve comportamento inverso ao tensímetro, com os menores coeficientes de correlação no intervalo de tempo mais úmido (0,94, 0,99 e 0,98) nas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m e as maiores correlações quando em condições de solo mais seco (0,98, 0,99 e 0,93), isso para as respectivas profundidades de monitoramento de 0,20, 0,35 e 0,50 m. De modo geral, observa-se que os sistemas tensímetro digital e vacuômetro de Bourdon apresentaram alto coeficiente de correlação, o que denota o quão eles estão relacionados.

O vacuômetro de Hg na profundidade de 0,20 m registrou potencial matricial máximo em -16 kPa, enquanto que o tensímetro digital alcançou valores próximos a -29 kPa e o vacuômetro de Bourdon aproximadamente -16 kPa. Ocorreu o mesmo para as profundidades de 0,35 m (-13, -25, -18 kPa) e de 0,50 m (-11, -23, -16 kPa) para mercúrio, tensímetro e Bourdon, respectivamente, evidenciando que para essa situação há maior proximidade dos dados do vacuômetro de Bourdon com aqueles observados para o vacuômetro de mercúrio – o sistema de leitura de referência.

Figura 3. Relação entre sistemas de leitura do tensiômetro para os potenciais matriciais medido nas profundidades de 0,20 m (A e B); 0,35 m (C e D); 0,50 m (E e F). *r*: coeficiente de correlação de Pearson; *b*: coeficiente angular da equação linear; **: significativo a 1% de probabilidade; ≠: diferente; reta 1:1 para os pares de dados do manômetro de Hg



Com base no teste *t* de Student, os interceptos das retas se diferenciam para os três sistemas de leitura, exceto nas profundidades de 0,20 e 0,35 m com o tensímetro se equiparando ao vacuômetro de Hg no período de maior umidade do solo (1 a 1511 horas) (Tabela 5). Este cenário evidencia a não similaridade das leituras quando, nas primeiras leituras até o tempo 1511 horas, mesmo com a água do solo na capacidade de campo, quando a partir daí, de 1708 a 3052 horas, com a água do solo deixando a capacidade de campo para uma condição mais

seca, os interceptos das retas tendem a se igualar entre os instrumentos. Com relação à inclinação das retas, verifica-se que o vacuômetro de Bourdon se equipara ao vacuômetro de Hg, com mesma inclinação de acordo com o teste t ao nível de significância de 10 %.

Tabela 5. Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear entre os sistemas de leitura alternativos com o manômetro de Hg no período experimental para o potencial matricial

Tempo (h)	Prof. (m)	Sistemas de leitura	Intercepto		Inclinação		
			t observado	t tabelado (10%)	t observado	t tabelado (10%)	
1 a 1511	0,20	Man. Hg - Tensímetro	0,424	1,679	31,946	1,679	
		Man. Hg - Bourdon	3,179	1,679	0,767	1,679	
		Tensímetro - Bourdon	2,755	1,679	3,826	1,679	
	0,35	Man. Hg - Tensímetro	1,273	1,679	23,972	1,679	
		Man. Hg - Bourdon	4,392	1,679	5,935	1,679	
		Tensímetro - Bourdon	3,119	1,679	13,469	1,679	
	0,50	Man. Hg - Tensímetro	2,449	1,679	4,228	1,679	
		Man. Hg - Bourdon	9,946	1,679	1,567	1,679	
		Tensímetro - Bourdon	7,496	1,679	3,562	1,679	
	1708 a 3052	0,20	Man. Hg - Tensímetro	1,160	1,740	7,700	1,740
			Man. Hg - Bourdon	1,419	1,740	4,311	1,740
			Tensímetro - Bourdon	0,259	1,740	8,749	1,740
0,35		Man. Hg - Tensímetro	0,591	1,740	6,009	1,740	
		Man. Hg - Bourdon	1,165	1,740	1,887	1,740	
		Tensímetro - Bourdon	0,574	1,740	5,393	1,740	
0,50		Man. Hg - Tensímetro	1,594	1,740	1,768	1,740	
		Man. Hg - Bourdon	2,513	1,740	1,512	1,740	
		Tensímetro - Bourdon	0,919	1,740	2,120	1,740	

Por outro lado, a inclinação da reta para o tensímetro foi diferente dos demais sistemas de leitura. Os estudos relacionados ao desempenho do tensímetro focam em erros desse sistema. Segundo Hoelscher, Nuttle e Harvey (1993), os componentes eletrônicos do tensímetro contribuem com mais erros sistemáticos do que é frequentemente assumido; os autores ainda sugerem que experimentos adicionais sejam realizados com o intuito de separar os erros entre os principais grupos de componentes que constituem o sistema. Com base nisso, a diferença nas leituras obtidas pelo tensímetro com relação aos demais sistemas é atribuída à sensibilidade dos componentes eletrônicos que o constituem, ressaltando que especificações e detalhes técnicos não são, na maioria das vezes, repassados pelos fabricantes aos que fazem uso do instrumento.

O tensímetro com transdutor de pressão precisa vencer a inércia para o perfeito funcionamento, uma vez que um diafragma no interior do instrumento precisa ser deformado para, então, um sinal elétrico proporcional à deformação, ser enviado e convertido em dígitos no display do equipamento. De acordo com Marinho, Take e Tarantino (2008), parte da variação no potencial matricial está relacionada à limitação no equipamento, pois quando o solo passa a umedecer ou secar, com conseqüente variação no volume de ar no interior do tensiômetro, a sensibilidade do equipamento não se mostra uniforme durante os vários ciclos desse processo.

Como se pode notar na Tabela 5, o tensímetro digital se mantém próximo ao vacuômetro de Hg na quase totalidade do potencial matricial lido para as profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m relacionadas aos tempos de 1 a 1511 horas (maiores potenciais), enquanto que o vacuômetro de Bourdon se distancia dos demais sistemas com o aumento do potencial matricial. A partir dos tempos de 1708 a 3052 horas (menores potenciais), acontece o inverso, com as leituras do vacuômetro de Bourdon se aproximando mais do vacuômetro de Hg, enquanto o tensímetro se distancia, considerando as respectivas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m.

Beraldo, Corá e Fernandes (2012), comparando tensiômetro com vacuômetro de mercúrio e com tensímetro digital de punção instalados a uma profundidade de 0,20 m em um Latossolo, encontraram coeficientes de determinação muito próximos aos encontrados neste estudo. Esses autores também ressaltaram o fato do tensímetro ter se distanciado do vacuômetro de Hg quando o solo se tornou mais seco.

Em relação às retas que relacionam o vacuômetro de Bourdon e o vacuômetro de Hg, além de não possuírem o mesmo intercepto e inclinação, seus valores não são aproximados. No caso do Bourdon, há que se levar em conta que o vacuômetro é constituído em parte por pequenas engrenagens metálicas que se movimentam na medida em que uma tensão é aplicada ao instrumento. Inicialmente, há que se vencer a inércia para, então, o sistema ser posto em funcionamento, daí o porquê de quanto mais próximas às condições de saturação o instrumento ser pouco sensível às variações do potencial mátrico da água no solo e, conseqüentemente, se distanciar mais do vacuômetro de mercúrio; o contrário se observa quando o solo se encontra em condição mais seca.

A menor sensibilidade ora relatada decorre da configuração do vacuômetro utilizado, com tubo em forma de “C”, bem menos sensível que os instrumentos com tubo em espiral (YOUNG; SISSON, 2002). Além disso, embora haja rigoroso controle de qualidade quando da construção dos vacuômetros, a sensibilidade não é a mesma para todos os instrumentos, o que contribui para a grande variabilidade das observações para o mesmo sistema de leitura.

Vale ressaltar também que o modelo do instrumento pode influenciar assumindo várias configurações, sendo que nesta pesquisa a configuração utilizada para o vacuômetro de Bourdon é constituída por um tubo em formato de “C”. Nesse aspecto, os modelos com tubo em espiral ou em hélice, por serem mais sensíveis, são os mais adequados para baixas tensões

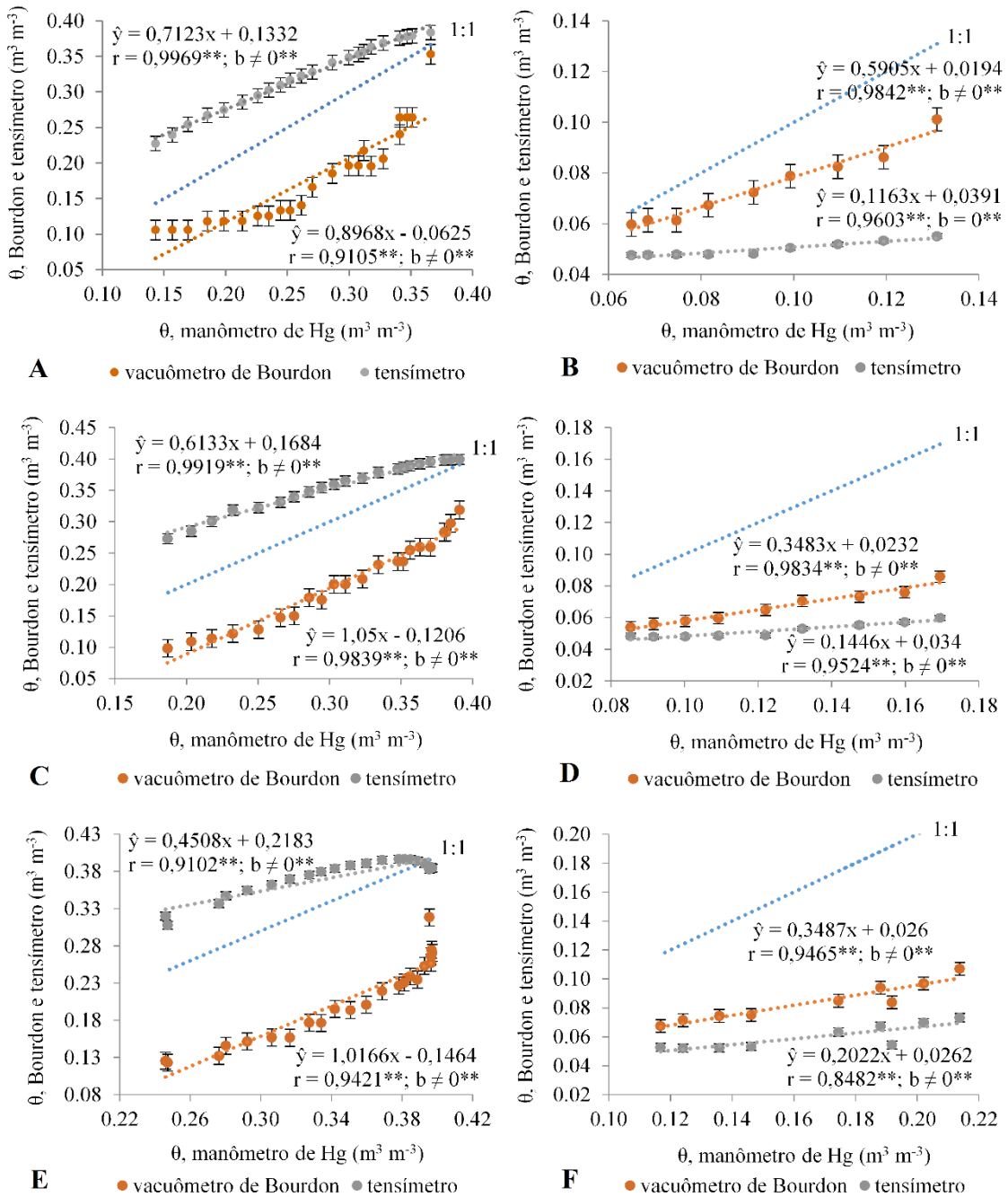
(YOUNG; SISSON, 2002). Face ao exposto, é pertinente recomendar a utilização de vacuômetros com sensor em espiral, particularmente quando o objetivo for mensurar o potencial matricial da água no solo na condição de umidade desde próxima à saturação até a capacidade de campo.

Para a umidade do solo, verifica-se que os sistemas de leitura respondem de maneira estatisticamente diferente à variação da umidade volumétrica do solo (Figura 4). Constatou-se que o tensímetro foi o instrumento com maior aproximação em relação ao sistema padrão, embora a partir de suas leituras na maioria das vezes a umidade tenha sido superestimada no tempo (1 a 1511 horas); por outro lado, o Bourdon foi o que mais se distanciou do vacuômetro de mercúrio levando à subestimativa da umidade em todas as leituras nas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m.

Nos tempos de avaliação quando o solo se encontrava com menor teor de água (1708 a 3052 horas), observa-se que ocorreu o inverso, com umidade superior para o vacuômetro de Bourdon, e este se aproximando do sistema com vacuômetro de mercúrio, e umidade inferior para o tensímetro digital com transdutor de pressão. Beraldo (2011), estudando tensiômetros em ciclos de umedecimento/secagem em Latossolo, obteve umidades estatisticamente semelhantes para o vacuômetro de mercúrio e tensímetro digital de punção para a profundidade de 0,20 m.

Observa-se correlação entre as umidades volumétricas obtidas pelos sistemas de leitura, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital com o vacuômetro de mercúrio (Figura 4). O alto coeficiente de correlação para o tensímetro digital variou de 0,9969, 0,9919 e 0,9102 para as respectivas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m correspondente aos tempos (1 a 1511 horas), e de 0,9603, 0,9524 e 0,8482 nas respectivas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m quando o solo se encontrava com menor teor de água na fase final do experimento (1708 a 3052 horas), quando foram observadas as menores correlações.

Figura 4. Relação entre sistemas de leitura do tensiômetro para as medições da umidade volumétrica, nas profundidades de 0,20 m (A e B); 0,35 m (C e D); 0,50 m (E e F). r: coeficiente de correlação de Pearson; b: coeficiente angular da equação linear; **: significativo a 1% de probabilidade; ≠: diferente; reta 1:1 para os pares de dados do manômetro de Hg



Já para o Bourdon foi o inverso do tensiômetro, com os menores coeficientes de correlação nas leituras repetidas no tempo de maior umidade (0,9105, 0,9839 e 0,9421), nas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m, e as maiores correlações quando nas condições do solo com baixa umidade (0,9842, 0,9834 e 0,9465), isso para as respectivas profundidades de monitoramento de 0,20, 0,35 e 0,50 m.

É importante observar esta relação entre os valores de umidade obtidos pelos sistemas de leitura do tensiômetro, tendo em vista que a determinação da umidade é de fundamental importância para a obtenção da função $K(\theta)$. Para cálculos de drenagem interna, necessita-se que as umidades obtidas por sistemas que possivelmente venham a substituir o vacuômetro de mercúrio sejam tão similares a ponto de não provocarem diferenças em seus coeficientes. Assim, observa-se alta relação linear entre os sistemas, com o tensiômetro se relacionando com valores muito próximos ao Bourdon.

O teste de interceptos evidencia igualdade entre os sistemas e em todas as profundidades de monitoramento, ao passo que o teste do coeficiente de inclinação não se diferencia para o vacuômetro de Bourdon em relação ao sistema padrão nos tempos correspondentes de 1 até 1511 horas nas respectivas profundidades 0,20, 0,35 e 0,50 m (Tabela 6). Com o solo mais seco já passando da capacidade de campo (1708 a 3052 horas), o teste de inclinação evidencia diferença entre os sistemas de leitura, ficando mais próximo o vacuômetro de Bourdon, enquanto que o tensiômetro digital se distancia em relação ao vacuômetro de Hg (sistema padrão).

Tabela 6. Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear entre os sistemas de leitura alternativos com o manômetro de Hg no período experimental para a umidade volumétrica

Tempo (h)	Prof. (m)	Sistemas de leitura	Intercepto		Inclinação	
			t observado	t tabelado (10%)	t observado	t tabelado (10%)
1 a 1511	0,20	Man. Hg - Tensímetro	0,108	1,679	23,712	1,679
		Man. Hg - Bourdon	0,051	1,679	0,231	1,679
		Tensímetro - Bourdon	0,057	1,679	0,412	1,679
	0,35	Man. Hg - Tensímetro	0,111	1,679	22,497	1,679
		Man. Hg - Bourdon	0,079	1,679	1,202	1,679
		Tensímetro - Bourdon	0,031	1,679	9,699	1,679
	0,50	Man. Hg - Tensímetro	0,105	1,679	12,265	1,679
		Man. Hg - Bourdon	0,083	1,679	0,140	1,679
		Tensímetro - Bourdon	0,041	1,679	4,469	1,679
1708 a 3052	0,20	Man. Hg - Tensímetro	0,019	1,740	69,159	1,740
		Man. Hg - Bourdon	0,009	1,740	10,184	1,740
		Tensímetro - Bourdon	0,010	1,740	11,240	1,740
	0,35	Man. Hg - Tensímetro	0,016	1,740	48,871	1,740
		Man. Hg - Bourdon	0,011	1,740	26,785	1,740
		Tensímetro - Bourdon	0,005	1,740	6,796	1,740
	0,50	Man. Hg - Tensímetro	0,011	1,740	13,645	1,740
		Man. Hg - Bourdon	0,111	1,740	17,762	1,740
		Tensímetro - Bourdon	0,100	1,740	2,235	1,740

De acordo com os valores dos coeficientes angulares, para cada unidade de umidade obtida pelo vacuômetro de Hg estes equivalem a 0,71, 0,61 e 0,45 no tensímetro digital nas respectivas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m e tempos (1 a 1511 horas); para o vacuômetro

de Bourdon, que se mostrou com os melhores resultados, os valores foram de 0,90, 1,05 e 1,02. Analisando os tempos a partir de 1708 até 3052 horas, tanto o tensímetro quanto o Bourdon subestimaram os valores de umidade em relação ao sistema padrão (vacuômetro de Hg). Com o tensímetro os valores foram de 0,12, 0,14 e 0,20, e para o Bourdon foram de 0,59, 0,35 e 0,35.

6 CONCLUSÕES

Após a inserção da agulha do tensímetro na câmara de ar do tensiômetro a leitura do instrumento pode ser realizada em quaisquer dos tempos desde 30 a 180 segundos;

O tensímetro substitui o vacuômetro de mercúrio na faixa de umidade desde a saturação até a capacidade de campo e o vacuômetro de Bourdon (com tubo em formato “C”), partindo da condição na ou próxima à capacidade de campo até a situação mais seca;

Os erros decorrentes da utilização de sistemas alternativos ao vacuômetro de mercúrio para a obtenção do potencial mátrico da água no solo se refletiram na estimativa da umidade do solo, tendo os sistemas alternativos subestimado os valores a partir da capacidade de campo.

7 AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela concessão da bolsa durante o período de estudo; e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), via PROAP (Programa de Apoio à Pós-Graduação) e Programa Pró-Integração (na parceria entre a Universidade Federal do Ceará e Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” ESALQ/USP), pelo apoio financeiro.

8 REFERÊNCIAS

BAKKER, G.; VAN DER PLOEG, M. J.; DE ROOIJ, G. H.; HOOGENHAM, C. W.; GOOREN, H. P. A.; HUISKES, C.; KOOPAL, L. K.; KRUIDHOF, H. New polymer tensiometers: Measuring matric pressures down to the wilting point. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 6, n. 1, p. 196-202, 2007.

BERALDO, J. M. G. **Armazenamento de água no solo em sequências de culturas de verão e inverno sob semeadura direta**. 2011. 115 f. Tese (Doutorado em Agronomia)- Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2011.

BERALDO, J. M. G.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, E. J. Measurement systems of soil water matric potential and evaluation of soil moisture under different irrigation depths. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 3, p. 467-478, 2012.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. *In*: KLUTE A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986a. Pt. 1, Chap. 13, p. 363-375. (Agronomy Monography, 9).

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. *In*: KLUTE A. (Ed.). **Methods of soil**

analysis. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986b. Pt. 1, Chap. 14, p. 377-382. (Agronomy Monography, 9).

BONOMO, D. Z.; BONOMO, R.; PARTELLI, F. L.; SOUZA, J. M.; MAGIERO, M. Desenvolvimento vegetativo do cafeeiro Conilon submetido a diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 7, n. 2, p. 157-169, 2013.

BRAGA, M. B.; CALGARO, M. **Uso da tensiometria no manejo da irrigação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. 28 p.

BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; MOTA, J. C. A.; KLEIN, V. A. Variação diurno-noturna do potencial mátrico e gradiente de potencial total da água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 128-134, 2014.

BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; MOTA, J. C. A.; MORAES, S. O. Desempenho do tensiômetro com diferentes sistemas de leitura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 17-24, 2009.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 191-192, 2000.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2013. 376 p.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. *In*: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. Pt. 1, p. 383-411. (Agronomy Monography, 9).

HILLEL, D.; KRENTOS, V. D.; STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. **Soil Science**, Philadelphia, v. 114, n. 5, p. 395-400, 1972.

HOELSCHER, J. R.; NUTTLE, W. K.; HARVEY, J. W. The calibration and use of pressure transducers in tensiometer systems. **Hydrological Processes**, Hoboken, v. 7, n. 2, p. 205-211, 1993.

KANDELOUS, M. M.; MORADI, B. A.; HOPMANS, J. W. An Alternative Tensiometer Design for Deep Vadose Zone Monitoring. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 79, n. 5, p. 1293, 2015.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. *In*: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. Pt. 1, p. 635-662. (Agronomy Monography, 9).

LEMON, E. R. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 20, p. 120-125, 1956.

MARINHO, F. A. M.; TAKE, W. A.; TARANTINO, A. Measurement of matric suction using tensiometric and axis translation techniques. **Geotechnical and Geological Engineering**, London, v. 26, n. 6, p. 615-631, 2008.

MARTHALER, H. P.; VOGELSANGER, W.; RICHARD, F.; WIERENGA, P. J. A pressure transducer for field tensiometers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n. 4, p. 624-627, 1983.

MARTINS, M. V. **Influência da distância de instalação de tensiômetros no campo para o cálculo do gradiente de potencial total no método do perfil instantâneo**. 2009. 77 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

MONTESANO, F. F.; SERIO, F.; MININNI, C.; SIGNORE, A.; PARENTE, A.; SANTAMARIA, P. Gerenciamento de Irrigação Baseada em Tensiômetro de Tomate Subterrâneo sem Sobrinho: Efeitos do Controle de Potencial Matricial do Substrato no Desempenho da Cultivo. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 6, n. 1150, p. 1-11, 2015.

MORAES, N. B.; MEDEIROS, J. F.; LEVIEN, S. L. A.; OLIVEIRA, A. M. S. Avaliação de cápsulas de cerâmica e instrumentos de medida de tensão usados em tensiômetros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 58-63, 2006.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 100 p.

TABLE CURVE 2D. **Table Curve 2D**. Trial Version 5.01. San Jose, Califórnia: Systat Software, 2014. Disponível em: <<https://systatsoftware.com/downloads/download-tablecurve-2d/>>. Acesso em: 19 maio 2014.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

WARRICK, A. W.; WIERENGA, P. J.; YOUNG, M. H.; MUSIL, S. A. Diurnal fluctuations of tensiometric readings due to surface temperatura changes. **Water Resources Research**, Amsterdam, v. 34, n. 11, p. 2863-2869, 1998.

YOUNG, M. H.; SISSON, J. B. Tensiometry. *In*: DANE, J. H.; TOPP, C. G. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: Part 4: Physical Methods**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. p. 575-678.