



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA: SOLOS E NUTRIÇÃO DE
PLANTAS

JOSIMAR DE AZEVEDO

ERROS EM SISTEMAS DE LEITURA DE TENSÍMETRO EM CONDIÇÕES DE
TEMPERATURA CONTROLADA

FORTALEZA

2015

JOSIMAR DE AZEVEDO

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

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

FORTALEZA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A987e Azevedo, Josimar.
Erros em sistemas de leitura de tensiômetro em condições de temperatura controlada / Josimar Azevedo. –
2016.
23 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de
Pós-Graduação em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas), Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

1. Potencial mátrico. 2. Água no solo. 3. Irrigação. I. Título.

CDD 631.4

JOSIMAR DE AZEVEDO

ERROS EM SISTEMAS DE LEITURA DE TENSIÔMETRO EM CONDIÇÕES DE
TEMPERATURA CONTROLADA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Aprovada em: 10/07/2015.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

À minha família, especialmente aos meus pais,
pelo esforço para que eu pudesse receber uma
educação diferenciada.

Aos conhecidos e amigos, pela admiração
diante do meu esforço, sempre aplaudindo a
cada passo, a cada degrau conquistado.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pela oportunidade de concluir mais uma etapa de minha formação acadêmica. Sem Ele nada do que foi feito seria possível.

Aos meus pais, Joaquim da Silva Azevedo e Irene Maria de Oliveira, por tudo o que fizeram para a minha realização pessoal e profissional. As palavras são insuficientes para expressar a minha gratidão.

Aos demais familiares, conhecidos e amigos que de maneira direta ou indireta contribuíram de alguma forma a cada etapa conquistada.

À Universidade Federal do Ceará, ao Departamento de Ciências do Solo e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade da realização do curso de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

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), por financiar esta pesquisa.

Ao Prof. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pela orientação, companheirismo, atenção, apoio, valiosos ensinamentos e exemplo de dedicação profissional.

Ao Prof. Raimundo Nonato de Assis Júnior, pelos ensinamentos e exemplo de competência profissional.

Aos colegas do grupo de pesquisa, Thiago Leite de Alencar, Alcione Guimarães Freire e Carlos Levi Anastácio dos Santos, por tornarem possível a realização deste trabalho.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas, pelo conhecimento transmitido nas suas disciplinas.

Aos funcionários do Departamento de Ciências do Solo, em especial, ao secretário da pós-graduação do programa, José Edilson Dote, pela sua responsabilidade e organização nas documentações.

Aos vizinhos e colegas do condomínio durante minha estada em Fortaleza, pelos momentos de lazer, descontração e companheirismo.

Aos colegas e amigos da UFC, Thiago Leite de Alencar, Alcione Guimarães Freire, Francisca Gleiciane da Silva, André Luiz Torres de Oliveira e Ícaro Vasconcelos do Nascimento, pela estimada amizade, consideração e companheirismo.

Aos colegas da turma de mestrado (2013.2), André Luiz Torres de Oliveira, Cillas Pollicarto da Silva, Crisanto Dias Teixeira Filho, Francisca Gleiciane da Silva, Kaio Gráculo Vieira Garcia e Tibério Almeida da Silva, pelo companheirismo, troca de conhecimentos ao longo do curso e convívio.

E aos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

“A mente que se abre para alguma coisa nova,
nunca mais será a mesma.” (Albert Einstein)

RESUMO

O solo e a água são recursos essenciais para o desenvolvimento da agricultura. Portanto, conhecer a dinâmica da água no solo é importante para o bom manejo do recurso água como fator de produção. Neste aspecto, considerando as hipóteses de que 1) outros sistemas de leitura do tensiômetro, desenvolvidos especificamente para a medição do potencial mátrico da água no solo, substituem o manômetro de mercúrio sem perda da qualidade da informação; 2) no tensiômetro em que se utiliza o tensímetro digital com transdutor de pressão, dada a perturbação que causa no sistema quando da inserção da agulha, se requer um decurso de tempo para que seja restabelecido o equilíbrio entre as tensões da água no interior do tensiômetro e no solo; e 3) os sistemas de leitura para a medição do potencial mátrico da água no solo, ainda que em condições controladas, produzem erros em relação ao sistema de referência afetando os cálculos que são dependentes desta variável. Neste caso, se objetivou com esta pesquisa aferir dois sistemas alternativos ao manômetro de mercúrio para a quantificação do potencial mátrico da água no solo, definir o tempo para que se restabeleça o equilíbrio descrito anteriormente e quantificar os erros envolvidos. O ensaio foi realizado em vasos com diâmetro médio de 0,38 m e profundidade de 0,65 m, com o fundo perfurado para permitir a drenagem, reproduzindo com adaptações às condições de contorno do método do perfil instantâneo. Os sistemas de leitura nos tensiômetros foram avaliados em laboratório (21 ± 1 °C), sendo instalados três tensiômetros por vaso, em um total de 18 aparelhos, com seis repetições, nas profundidades de 0,20 m, 0,35 m e 0,50 m. Quando das leituras, para evitar modificações no equilíbrio estabelecido entre a câmara de ar, a água do tensiômetro e a água no solo, procedeu-se inicialmente a leitura no manômetro de mercúrio, vacuômetro de Bourdon, nessa ordem, para, em seguida, proceder a leitura com o tensímetro digital contendo o transdutor de pressão (neste último se fez a inserção da agulha e a leitura foi feita em 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos após). O experimento teve duração de 127 dias, totalizando 3052 horas. Concluiu-se que: 1) após a inserção da agulha do tensímetro na câmara de ar do tensiômetro, a leitura deve ser realizada em 30 segundos; 2) o tensímetro pode substituir o sistema padrão na medida do potencial matricial da água no solo na faixa de umidade desde a saturação até a capacidade de campo, e o Bourdon partindo da condição na ou próxima à capacidade de campo até a situação mais seca; e 3) os erros decorrentes da utilização de sistemas alternativos ao manômetro de mercúrio para a obtenção do potencial mátrico da água no solo também se refletiram na mensuração da umidade do solo, tendo os sistemas alternativos subestimado os valores a partir da capacidade de campo.

Palavras-chave: Potencial mátrico. Água no solo. Irrigação.

ABSTRACT

Soil and water are essential resources for the development of agriculture. Thus, the knowledge on soil water dynamics is important for a good management of the resource water as a production factor. In this aspect, the following hypotheses were considered: 1) other tensiometer reading systems, specifically developed to measure soil water matric potential, substitute the mercury manometer with no loss of information quality; 2) when a digital tensimeter with pressure transducer is used in the tensiometer, given the disturbance caused by the insertion of the needle, a time interval is required for the reestablishment of the equilibrium between the tensions of the water inside the tensiometer and in the soil; and 3) even under controlled conditions, the reading systems for the measurement of soil water matric potential produce errors compared with the reference system, which affect the calculations that depend on this variable. This study aimed to evaluate two systems alternative to the mercury manometer for the quantification of the soil water matric potential, define the time necessary to reestablish the previously described equilibrium and quantify the errors involved. The experiment was performed using pots with mean diameter of 0.38 m and depth of 0.65 m, perforated at the bottom to allow drainage, reproducing the boundary conditions of the instantaneous profile method, with adaptations. The tensiometer reading systems were evaluated in the laboratory (21 ± 1 °C); three tensiometers were installed in each pot at the depths of 0.20 m, 0.35 m and 0.50 m, totaling 18 devices, with 6 replicates. In order to avoid changes in the equilibrium between the air chamber, tensiometer water and soil water, the reading sequence was: mercury manometer, Bourdon gauge and digital tensimeter with pressure transducer (this one with readings at 30, 60, 90, 120, 150 and 180 seconds after needle insertion). At the end of the experiment, after 3052 h, it was concluded that: 1) after needle insertion of the tensimeter in the air chamber of the tensiometer, the reading must be performed in 30 seconds; 2) the tensimeter can substitute the standard system in the measurement of soil water matric potential in the moisture range from saturation until field capacity, and the Bourdon from a condition at or close to field capacity until a drier situation; and 3) the errors resulting from the use of systems alternative to the mercury manometer to obtain soil water matric potential also reflected in the measurement of soil moisture, and the alternative systems underestimated the values from the field capacity on.

Keywords: Matric potential. Soil water. Irrigation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração da distribuição no vaso dos tensiômetros construídos com os três sistemas de leitura.	23
Figura 2 - Relação correspondente aos tempos de equilíbrio do tensímetro digital relacionado aos potenciais matriciais nas profundidades de 0,2 m (A e B); 0,35 m (C e D); 0,50 m (E e F).	28
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).	35
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).	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Análise granulométrica do solo, consideradas as profundidades em campo.	21
Tabela 2- Relação correspondente aos tempos de equilíbrio do tensímetro digital para os potenciais matriciais em relação aos coeficientes de correlação linear.	29
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).	30
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).	31
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.	36
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.	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1 Potencial mátrico da água no solo	14
2.2 Princípio de funcionamento do tensiômetro.....	14
2.3 Sensibilidade dos sistemas de leitura em relação ao potencial mátrico	15
2.5 Erros nos sistemas de leitura	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1 Caracterização experimental	21
3.2 Análises físicas.....	21
3.3 Confecção dos tensiômetros e instalação do experimento no laboratório	22
3.4 Cálculo do potencial mátrico da água no solo	23
3.4.1 Manômetro de mercúrio	23
3.4.2 Vacuômetro de Bourdon.....	24
3.4.3 Tensímetro digital.....	24
3.5 Outros cálculos de água no solo.....	24
3.6 Análise dos dados	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 Tempo de equilíbrio do potencial mátrico utilizando o tensímetro digital com transdutor de pressão	27
4.2 Variação do potencial mátrico entre os sistemas de leitura.....	31
4.3 Variação da umidade entre os sistemas de leitura	36
5 CONCLUSÕES.....	40
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

O solo e a água são recursos essenciais para o desenvolvimento da agricultura, portanto é de fundamental importância saber explorá-los com eficácia. O conhecimento da dinâmica da água no solo é necessário para que seja possível maximizar seu uso, pois se sabe que este recurso caminha para escassez.

Na região Nordeste do Brasil, tem se intensificado o uso da irrigação como forma de aumentar a produção agrícola, sendo que as condições hídricas têm se tornado críticas, devido às baixas precipitações e elevadas evapotranspirações, necessitando em muitos casos de um plano de manejo para o seu uso, sem desperdício de água e com aumento da produtividade das culturas.

Manejar corretamente a irrigação na aplicação de água 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.

Diversos equipamentos, como sondas capacitivas, TDRs e sonda de nêutrons, têm sido utilizados para o monitoramento da umidade no solo, assim como o tensiômetro, servindo como ferramenta no manejo da irrigação, tendo em vista ser um equipamento prático, de baixo custo, além de ser o mais sensível e um dos mais exatos para a determinação do potencial mátrico da água no solo.

Como visto, para garantir o manejo eficiente da água levando em consideração a sua racionalização, uma importante variável a ser mensurada é a energia com que a água se encontra aderida à matriz do solo, conhecida na literatura por potencial mátrico da água no solo. Para tanto, o tensiômetro é um instrumento de medida direta desse potencial da água no solo e possibilita medições in situ, com sensibilidade e precisão dos resultados dependentes do tipo de manômetro utilizado.

Erros são inerentes a cada sistema de leitura quando propagados em maior ou menor intensidade nas estimativas de outras variáveis no solo que dependem do conhecimento desse potencial mátrico.

Os tensiômetros convencionais de manômetro de mercúrio são usados para obtenção das leituras para a medida do potencial mátrico da água no solo. É um sistema considerado mais sensível e exato, o que faz com que seja tomado como padrão para aferição dos demais modelos. 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.

Considerando as hipóteses de que: 1) outros sistemas de leitura do tensiômetro, desenvolvidos especificamente para a medição do potencial mátrico da água no solo, substituem o manômetro de mercúrio sem perda da qualidade da informação; 2) no tensiômetro em que se utiliza o tensímetro digital com transdutor de pressão, dada a perturbação que causa no sistema quando da inserção da agulha, se requer um decurso de tempo para que seja restabelecido o equilíbrio entre as tensões da água no interior do tensiômetro e no solo; e 3) os sistemas de leitura para a medição do potencial mátrico da água no solo, ainda que em condições controladas, produzem erros em relação ao sistema de referência afetando os cálculos que são dependentes desta variável.

Neste caso, se objetivou com esta pesquisa aferir dois sistemas alternativos ao manômetro de mercúrio para a quantificação do potencial mátrico da água no solo, definir o tempo para que se restabeleça o equilíbrio descrito anteriormente e quantificar os erros envolvidos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Potencial mátrico da água no solo

Para a água do solo ser manejada de forma adequada, uma variável a ser mensurada é a energia com que ela se encontra aderida à matriz do solo, conhecida na literatura por potencial mátrico (BUCKINGAM, 1907).

Reichardt *et al.* (2004) definem potencial mátrico da água no solo como a representação envolvendo as interações da água com a matriz sólida do solo, o que resulta da ação capilar juntamente com adsorção, fazendo com que a energia potencial da água no solo diminua em relação à da água livre.

Esse potencial pode ser medido por meio de um instrumento como o tensiômetro, que pode ser facilmente confeccionado aderindo uma cápsula porosa de cerâmica na extremidade inferior do tubo de plástico de PVC e, na extremidade superior, um manômetro de mercúrio ou vacuômetro de Bourdon ou um transdutor de pressão (tensímetro digital) para a medida da tensão dentro do tensiômetro, e neste caso, a água sob tensão no solo entra em equilíbrio com a água no tensiômetro via cápsula porosa (OR, 2001). O tensiômetro serve como instrumento de medição desse potencial, como forma de tornar racional o uso da água na irrigação (KLEIN, 2001).

2.2 Princípio de funcionamento do tensiômetro

O instrumento funciona baseado no equilíbrio entre a água em seu interior e a água do solo. Conforme a água presente no solo vai reduzindo, a pressão interna do equipamento tende a diminuir, em virtude da saída de água de seu interior pela cápsula porosa. Como o instrumento é fechado, ocorre a formação do vácuo e, no equilíbrio, a leitura correspondente fornece o potencial mátrico da água no solo (BRITO *et al.*, 2009).

Autores têm apontado para certas limitações do uso do tensiômetro, independentemente do sistema de leitura utilizado, a sua faixa de operação tem se restringido a potenciais mátricos entre 0 e -90 kPa (DURIGON; JONG VAN LIER, 2011). Porém, mesmo sendo considerado uma limitação, a sua faixa de operação cobre o principal intervalo de umidade para a maioria dos solos quando no manejo da irrigação, sendo maiores quantidades de água retida entre os potenciais de 0 e -100 kPa do que entre -100 e -1500 kPa (REICHARDT; TIMM, 2012). Neste caso, deve-se levar em consideração o tipo de solo, uma

vez que para as texturas argilosa e arenosa há diferença na quantidade de água armazenada para uma mesma tensão de água no solo (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

O cuidado que se deve ter quando se usa este tipo de instrumentação é o problema da cavitação, uma vez que em tensão próxima a 100 kPa aparecem bolhas de ar que interferem no equilíbrio, chegando até a romper a coluna de água (REICHARDT; TIMM, 2012).

Bakker *et al.* (2007) desenvolveram um outro modelo de tensiômetro, o de polímeros, que possibilita medir a tensão da água no solo desde a saturação até valores próximos a -2,0 MPa. Durigon e Jon van Lier (2011) testaram este tensiômetro em experimentos de evaporação com colunas de solo e concluíram que o instrumento permite medir diretamente potenciais mátricos da água no solo até valores próximos ao do ponto de murcha permanente (-1,5 MPa).

2.3 Sensibilidade dos sistemas de leitura em relação ao potencial mátrico

Os tensiômetros convencionais de manômetro de mercúrio são usados para a medida do potencial mátrico da água no solo, pois é o mais sensível e exato, o que faz com que seja considerado padrão nos programas de irrigação. No entanto, uma das justificativas para ser substituído por outros modelos é que, além da dificuldade de aquisição do mercúrio como líquido manométrico, sua montagem, manutenção e operação têm sido um problema para a utilização do instrumento (ASSIS JÚNIOR, 1995).

Por isso há a necessidade da introdução de outros sensores que acoplados ao tensiômetro se prestam à medição do potencial mátrico. Como exemplo, no tensiômetro digital se utiliza um transdutor de pressão como elemento sensível para transmitir um sinal correspondente à tensão no interior do tensiômetro no momento da leitura. O sistema transdutor de pressão é de fácil manuseio e requer pouca manutenção (MARTHALER *et al.*, 1983).

Porém, considerações devem ser feitas com relação ao tensiômetro digital com o intuito de provocar novas pesquisas. Segundo Marthaler *et al.* (1983), quando se faz inserção da agulha do tensiômetro na câmara do tensiômetro, que possui um volume de ar em sua câmara e na própria agulha submetida à pressão atmosférica, causa um pequeno decréscimo na tensão e um novo equilíbrio há que se estabelecer, sendo uma das possíveis causas da menor leitura observada no tensiômetro. Os autores ressaltam ainda que a inserção da agulha

do tensímetro na câmara do tensiômetro pode provocar uma pequena deflexão da rolha para baixo e, conseqüentemente, uma saída de água do tensiômetro.

Devido a essas perturbações, o equilíbrio da tensão da água no interior do tensiômetro com a tensão da água no solo pode ser retardado, o que também é dependente da condutividade hidráulica do solo e da condutância da cápsula porosa, pois, quanto mais seco se encontrar o solo, maior deverá ser o tempo para que se atinja um novo equilíbrio, uma vez que a condutividade hidráulica é função da umidade do solo, e neste caso, fazendo com que o reequilíbrio só ocorra em um intervalo de tempo que varia de dois a dez minutos (MARTHALER *et al.*, 1983).

Moraes *et al.* (2006), em campo, verificaram que tipos de medidor indicaram potenciais significativamente diferentes, isto é, o transdutor de pressão apresentou valores de potenciais mátricos superiores aos do manômetro de mercúrio, embora ambos tenham apresentado alta correlação. Os autores verificaram que o valor da tensão obtido pelo tensímetro é igual a 84% do valor determinado pelo manômetro de Hg, diferença esta que pode ser atribuída ao volume de ar que a agulha do tensímetro apresenta, devido ter ocorrido aumento do volume da câmara de ar do tensiômetro no momento em que a agulha do instrumento é conectada ao tensiômetro, para que se consiga um novo equilíbrio, além do efeito da histerese existente, devido ao secamento/umedecimento do solo, com aumento ou diminuição da câmara de ar. É importante destacar que no experimento as leituras foram feitas instantaneamente, não esperando o tempo de reequilíbrio na câmara.

Brito *et al.* (2009) avaliaram tensiômetros com três sistemas de leitura (manômetro de mercúrio, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital com transdutor de pressão) e concluíram que o vacuômetro de Bourdon apresentou maior exatidão e eficiência que o tensímetro digital e, na ausência do manômetro de mercúrio, deve ser preferido para a medida do potencial mátrico da água no solo. Os autores verificaram ainda que o tensímetro digital superestimou os valores de potencial mátrico em comparação aos valores obtidos pelo manômetro de mercúrio e vacuômetro de Bourdon.

2.4 Influência do ambiente na leitura do potencial mátrico em relação aos sistemas de leitura

A variação diurna do potencial mátrico da água no solo, medida pelo tensiômetro, não está completamente relacionada às mudanças do conteúdo de água no solo, ou seja, existe a influência de outros fatores (HAISE; KELLEY, 1950). Por exemplo, o tipo de instrumento

para a medida do potencial mátrico, o tempo de equilíbrio da tensão da água no solo com a tensão no interior do instrumento e o horário de leitura, em razão da influência dos fatores climáticos, são muito importantes para a correta tomada dos dados (BRITO *et al.*, 2009).

O tensiômetro com transdutor de pressão, quando utilizado em laboratório nas condições ambientais, apresenta sensibilidade às variações de temperatura, isto é, ocorrem flutuações na pressão registrada pelo transdutor (WATSON; JACKSON, 1967).

Azooz e Arshad (1994) compararam tensiômetros como transdutor de pressão e vacuômetro de Bourdon, estudando o efeito temperatura, e verificaram que ambos os equipamentos não diferiram significativamente em laboratório e campo, e que houve decréscimo nas leituras de tensão com acréscimo na temperatura.

Brito *et al.* (2009) trabalharam em condições de campo e observaram que a temperatura não influenciou as leituras obtidas pelos sistemas com manômetro de mercúrio, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital com transdutor de pressão, da mesma forma que as leituras em dois horários distintos (entre 7 e 8 h e entre 16 e 17 h) às quais estiveram submetidos os tensiômetros. Embora não tenha havido diferença significativa para os horários de leitura, os autores sugeriram o período matinal como o mais adequado à leitura dos tensiômetros, uma vez que os desvios-padrão foram menores para esse horário, enquanto que no período da tarde a variabilidade foi superior, sugerindo efeito da oscilação térmica durante o dia, ao contrário das medidas realizadas pela manhã, quando os instrumentos são submetidos às condições térmicas mais estáveis do período noturno.

Brito *et al.* (2014) trabalharam em campo usando tensiômetros com transdutores de pressão e recomendaram fazer leituras nas primeiras sete horas do dia ou no período noturno após as 18 h devido à influência da temperatura na medida do potencial mátrico. Para experimentos que necessitem de leituras ao longo do dia, como é o caso da fase inicial da determinação da condutividade hidráulica do solo, esses autores sugeriram proteger o sistema de medida da radiação solar direta, pois o potencial mátrico e o gradiente de potencial total da água no solo passam a ter influência da variação da temperatura atmosférica e do solo, ocasionando diminuição de ambos nas horas mais quentes do dia. Os autores reforçam a hipótese de que a influência da temperatura na medida do potencial mátrico está relacionada com o transdutor de pressão e com a flutuação da câmara de ar deixada no interior do tensiômetro e o transdutor de pressão. Por isso, é recomendável proteger o transdutor de pressão da radiação solar direta.

Erros nas leituras, decorrentes das flutuações diurnas de temperatura, tendem a ser mais evidentes à medida que o potencial matricial diminui, isto é, que o solo seca. Assim,

sensores de temperatura em transdutores de pressão são de fundamental importância para evitar erros, principalmente para leituras coletadas em horário de maiores temperaturas (COELHO; TEIXEIRA, 2004). Warrick *et al.* (1998) observaram aumento da tensão durante as horas mais quentes do dia, que 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. Na câmara do tensiômetro, quando há expansão do ar com o aumento da temperatura a tendência também é de aumento na tensão em decorrência do aumento da pressão, principalmente da pressão de vapor de água.

Bakker *et al.* (2007) verificaram picos nas medidas de potencial mátrico quando ocorreram mudanças abruptas de temperatura, ao avaliarem tensiômetros construídos à base de um polímero que permite ampliar a faixa de tensão de funcionamento desses em relação aos convencionais. Segundo os autores, embora os problemas maiores sejam em campo, o comportamento da tensão às mudanças bruscas de temperatura ainda não foi estudado em condições de laboratório. Cassel e Klute (1986) citam que para minimizar os efeitos da temperatura deve-se dar preferência aos materiais plásticos para confecção do tubo em vez de outros materiais, como metal.

Buchter *et al.* (1999) em condições de campo, investigaram o efeito da temperatura ao longo da parede do tubo que compõe o tensiômetro em estimativas de potencial mátrico utilizando tensiômetros com diferentes materiais e variando a espessura e comprimento da parede do tubo. Como precaução, os autores recomendaram que as leituras devem ser feitas após a meia noite ou, os tensiômetros devem ser isolados contra a flutuação da temperatura do ar e radiação. O material utilizado no tubo do tensiômetro tem grande influência sobre a leitura, com tubos de CAB (celulose acetate butyrate) apresentando menor sensibilidade a flutuações diurnas de temperatura e radiação do que o tubo PVC (polyvinyl chloride), embora a propriedade que fornece essa estabilidade não seja conhecida nesse estágio. Mesmo assim, os autores não descartam a possibilidade do uso do PVC, a menos que eles sejam protegidos adequadamente contra a flutuação de temperatura.

Segundo Warrick *et al.* (1998), os tensiômetros que operam com cápsula próxima à superfície do solo são influenciados pela temperatura, tornando importante conhecer o comportamento desses equipamentos em relação à variável potencial mátrico da água no solo. As flutuações nas leituras dos tensiômetros são causadas pelas variações de temperatura na superfície do solo, tornando complicada a obtenção da verdadeira medida do potencial mátrico da água no solo.

Nyhan, Drennon e Gaylor (1987) encontraram variações nos valores de potencial mátrico obtidos com tensiômetros acoplados a transdutores de pressão e tensiômetros de manômetro de mercúrio sob condições de campo quando comparados com os resultados obtidos pelos mesmos instrumentos sob condições de temperatura controlada. As variações nos valores dos potenciais acompanharam as variações diárias das temperaturas, sendo que essas variações foram maiores nas profundidades de 0,30 e 0,60 m do que na profundidade de 2,20 m.

Brito *et al.* (2009) compararam, em campo, duas profundidades (0,2 m e 1,0 m) com relação ao potencial mátrico. Esses autores observaram que na profundidade mais superficial houve maior variação no potencial mátrico da água no solo, fato que atribuíram ao secamento/umedecimento do solo e à variação da temperatura; na profundidade de 1,0 m essa variação foi bem menor, em decorrência das condições de umidade e temperatura serem mais estáveis. Da mesma forma, também em condições de campo, Brito *et al.* (2014) encontraram o mesmo comportamento ao estudarem várias camadas de solo, sendo que o potencial mátrico da água no solo medido em todas as profundidades seguiu uma mesma tendência, ou seja, teve seu valor diminuído, principalmente no período de maior temperatura do ar, determinado na superfície do solo (sob cobertura plástica), e do solo (0,025; 0,050 e 0,075 m de profundidade).

2.5 Erros nos sistemas de leitura

Erro, por definição, é a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro da grandeza. A toda medida realizada está associado um erro, ou seja, uma flutuação no entorno do valor medido. Esta flutuação pode ser devida a vários fatores. Dentre eles, podem ser citados o instrumento, o operador, o procedimento experimental, as condições ambientais etc.

Os erros são classificados como estatísticos ou aleatórios e sistemáticos. Quanto aos erros estatísticos ou aleatórios, estão relacionados à precisão do aparelho e às condições externas aleatorizadas de medição, por exemplo, interferências nos procedimentos, falhas do instrumento, erro humano, situações imprevisíveis devido a numerosas causas (neste caso, são inconstantes, totalmente ignoradas ou pouco conhecidas). Os erros sistemáticos se dividem em: sistemáticos instrumentais, relacionados com equipamentos mal calibrados; sistemáticos ambientais, devidos aos efeitos do ambiente sobre o experimento; sistemáticos operacionais, devidos às falhas do procedimento de medição adotado pelo experimentador ou às limitações

do operador; e os sistemáticos teóricos, devidos às falhas conceituais tais como aproximações de modelos teóricos, constantes físicas etc. (STEM; GIRALDEZ; MATTA, 2014).

Para entender as causas dos erros, devem ser observadas as grandezas físicas que são determinadas por meios experimentais em função de medidas ou combinações destas, bem como suas incertezas intrínsecas, decorrentes das características dos aparelhos utilizados no processo de medição. As medidas de grandezas físicas podem ser classificadas em diretas ou indiretas, sendo as diretas não dependentes de outra grandeza para a sua determinação, medidas diretamente por meio de algum instrumento. Já as medidas indiretas, geralmente, são obtidas por uma relação matemática existente entre outras grandezas possíveis de serem medidas diretamente (STEM; GIRALDEZ; MATTA, 2014).

Características como variabilidade espacial do solo, assim como manuseio do equipamento, podem causar erros na leitura do potencial mátrico que influenciam na informação da condutividade hidráulica e do gradiente de potencial total da água no solo (SAUNDERS; LIBARDI; REICHARDT, 1978). Fatores como esses ocasionam maior amplitude nos valores dos desvios na estimativa de fluxos de água no solo (LIBARDI; REICHARDT, 1978).

Para Sentelhas *et al.* (1997), quando se pretende fazer substituição de um instrumento convencional, seja por questão de automação na aquisição dos dados, por exemplo, ou por outra melhoria qualquer, ter a confiabilidade no instrumento a ser substituído para o novo modelo de equipamento é um aspecto importante a ser observado. Esse é um ponto fundamental a ser avaliado, uma vez que os dados obtidos no novo modelo de instrumento devem apresentar características semelhantes ao modelo substituído.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização experimental

O ensaio foi realizado com solo classificado como Argissolo Amarelo, cujos teores de areia, silte e argila estão apresentados na Tabela 1, localizado no campus do Pici Professor Prisco Bezerra, na Universidade Federal do Ceará, em Fortaleza, Ceará. Os vasos com diâmetro médio de 0,38 m e profundidade de 0,65 m, 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). Assim, para atender às condições de contorno do método, garantiu-se que o fluxo de água no solo ocorresse somente na direção vertical. No vaso em que os tensiômetros foram instalados a própria parede garante o fluxo apenas na direção vertical.

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

Fonte: Autor.

3.2 Análises físicas

Foram feitas coletas de amostras de solo com estrutura não preservada e preservada para descrição física do solo. As amostras 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).

3.3 Confeção dos tensiômetros e instalação do experimento no laboratório

Os tensiômetros foram construídos de modo a permitir que o manômetro de mercúrio, o vacuômetro de Bourdon e o tensímetro digital com transdutor de pressão funcionassem em um mesmo instrumento, fazendo com que cada sistema de leitura fosse sujeito às mesmas condições naquele aparelho. Os tensiômetros foram confeccionados com tubos de PVC rígido, com diâmetros externo e interno de 0,021 e 0,016 m, respectivamente, e comprimento correspondente à profundidade de instalação mais 0,60 m acima da superfície do solo (sendo 0,20 m de PVC e 0,35 m de tubo de acrílico transparente e a cápsula porosa de 0,05 m de comprimento e diâmetro externo de 0,021 m para ficar em contato com o solo).

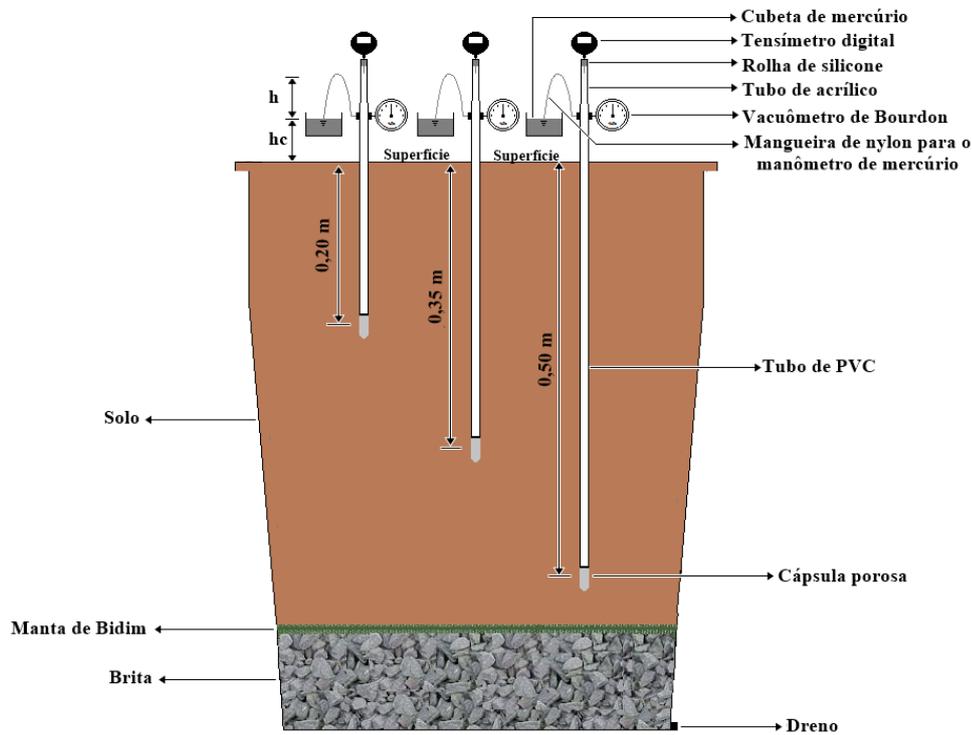
O aparato destinado ao funcionamento do manômetro de mercúrio foi composto por uma mangueira de “nylon”, com diâmetro interno de 0,002 m, colada ao tubo de PVC, conectando o tensiômetro a uma cuba com mercúrio. Para o tensiômetro de Bourdon, foi utilizado um vacuômetro com fundo de escala de 760 mmHg, com divisões de 20 mmHg. Para a medição com o tensímetro digital com transdutor de pressão, os tubos de acrílico foram vedados com uma rolha de silicone.

Após a construção, os tensiômetros foram avaliados em ensaio no laboratório, sendo instalados três tensiômetros por vaso, num total de 18 aparelhos, com seis repetições, em vasos contendo solo, correspondente à terra fina seca ao ar (TFSA), nas profundidades de 0,20 m, 0,35 m e 0,50 m (Figura 1). No fundo do vaso 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, mantendo a mesma disposição das classes texturais verificadas em campo para aquele solo. Em seguida, se fez a instalação dos tensiômetros com suas cápsulas porosas nas profundidades citadas anteriormente.

Feita a instalação, o solo foi saturado por capilaridade para, então, serem iniciadas as leituras nos instrumentos. A saturação foi feita 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 os procedimentos descritos anteriormente, embora não houvesse diferença significativa para os horários de leitura, por se tratar de experimento em laboratório com utilização de condicionadores de ar em que se manteve a temperatura controlada (21 ± 1 °C), as leituras diárias nos tensiômetros foram realizadas sempre às 8 h da manhã.

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



Fonte: Autor.

Para evitar modificações no equilíbrio estabelecido entre a câmara de ar, localizada na porção superior do tensiômetro, a água do tensiômetro e a água no solo, procedeu-se inicialmente a leitura no manômetro de mercúrio, vacuômetro de Bourdon, nessa ordem, para, em seguida, proceder a leitura com o tensiômetro digital contendo o transdutor de pressão (neste último 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, 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.

3.4 Cálculo do potencial mátrico da água no solo

3.4.1 Manômetro de mercúrio

Os dados dos tensiômetros com manômetro de mercúrio foram obtidos medindo-se a elevação da coluna de mercúrio na mangueira de “nylon”, calculando-se o potencial mátrico da água no solo (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.

3.4.2 Vacuômetro de Bourdon

Com o vacuômetro de Bourdon as leituras foram feitas diretamente no visor do instrumento. O potencial mátrico da água no solo (ϕ_m , m) foi calculado pela equação (2),

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

em que L é a leitura no visor analógico, mmHg; h a altura da coluna de água acima do ponto de inserção do manômetro, m; h_c a altura de inserção do manômetro de Bourdon no tubo de PVC em relação à superfície do solo, m; e z a distância entre o centro da cápsula e a superfície do solo, m.

3.4.3 Tensímetro digital

Para o tensímetro digital com transdutor de pressão, os dados foram obtidos conectando-se o sensor com a câmara de ar por meio de uma agulha, promovendo-se assim a tensão para o tensímetro. O potencial mátrico da água no solo (ϕ_m , m) pela equação (3),

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

em que L é a leitura no visor digital, mmHg; $h_e = h_c + h$, m; e z a distância entre o centro da cápsula e a superfície do solo, m.

3.5 Outros cálculos de água no solo

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 m 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), 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 da mesa de tensão de placa porosa. Para os demais pontos (33, 100 e 1500 kPa), utilizou-se o extrator de placa porosa de Richards (KLUTE, 1986). Obtidos os valores de umidade do solo em todos os pontos de tensão, foi feito o ajuste dos dados de acordo com o modelo matemático proposto por van Genuchten (1980), a partir da equação (5),

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

em que θ corresponde ao conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), θ_r e θ_s são, respectivamente, os teores de água residual e de saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), ϕ_m o potencial mátrico da água no solo (kPa), α (escalador do ϕ_m); m e n são parâmetros de ajuste do modelo relacionados ao formato da curva. Os dados foram ajustados com o auxílio do programa Table Curve 2D, versão 5.01 (Versão Trial, 2014), sendo as variáveis θ_s e θ_r fixadas com valores, respectivamente, de conteúdo de água no solo correspondente à saturação e tensão de 1500 kPa, ambos mensurados em laboratório. O ajuste dos parâmetros α , m e n seguiu o método iterativo de Newton-Raphson, sem dependência do parâmetro m com o n (DOURADO NETO *et al.*, 2000).

3.6 Análise dos dados

Para determinação do tempo em que se estabeleceu o equilíbrio entre as tensões da água no interior do tensiômetro e a da água no solo, realizaram-se 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 ao nível de 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 afim de identificar a dependência do potencial mátrico em função do tempo, como também o teste do coeficiente de correlação linear. Este coeficiente quantifica o grau de associação entre duas variáveis, podendo variar entre -1 (máxima correlação linear negativa) e 1 (máxima correlação linear positiva). Quanto mais próximo de zero, menor a correlação. O coeficiente de correlação foi estimado por

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

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

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

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

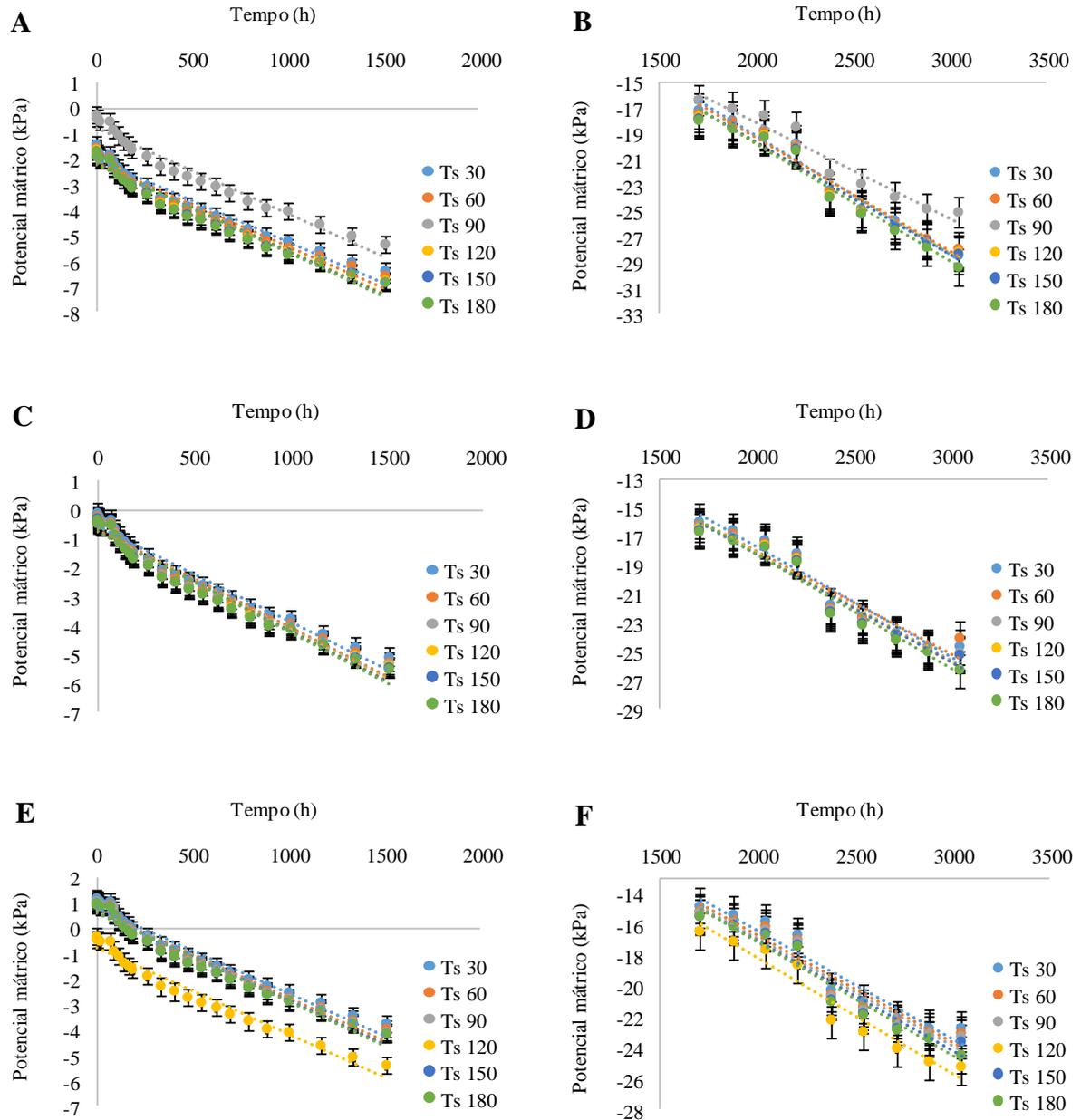
4.1 Tempo de equilíbrio do potencial mátrico utilizando o tensímetro digital com transdutor de pressão

Analisando 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 alto coeficiente de correlação linear com o potencial matricial com valores sempre acima de 0,96 (Tabela 2).

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

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 20 cm, 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.

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



Fonte: Autor.

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	b
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**	$\neq 0^{**}$

Fonte: Autor.

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	

Fonte: Autor.

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	

Fonte: Autor.

4.2 Variação do potencial mátrico entre os sistemas de leitura

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 é mostrada a correlação entre os potenciais matriciais obtidos pelos sistemas de leitura, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital com o manômetro de mercúrio. O alto coeficiente de correlação para o tensímetro digital apresentou valores de 0,9986, 0,9985 e 0,9966 para as respectivas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m correspondente à parte úmida (1 a 1511 horas), isto é, numa condição próximo a 1 atm e de 0,9842, 0,9734 e 0,8456 nas respectivas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m, quando o solo se encontrava mais seco, e já na fase final experimental (1708 a 3052 horas) com menores coeficientes de correlação. Já para o Bourdon, foi o inverso do tensímetro, com os menores coeficientes de correlação no intervalo de tempo mais úmido (0,9376, 0,9944 e 0,9778) nas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m e as maiores correlações quando em condições de solo mais seco (0,9807, 0,9937 e 0,9322), isso para as respectivas profundidades de monitoramento de 0,20, 0,35 e 0,50 m. De um modo geral, observa-se que os sistemas tensímetro digital e vacuômetro de Bourdon apresentaram um alto coeficiente de correlação, o que denota o quão eles estão relacionados.

O manômetro 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.

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 manômetro 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 manômetro de Hg, com mesma inclinação de acordo com o teste t ao nível de significância de 10%.

De modo diferente, o tensímetro levou a que a reta dele decorrente apresentasse inclinação distinta 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 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.

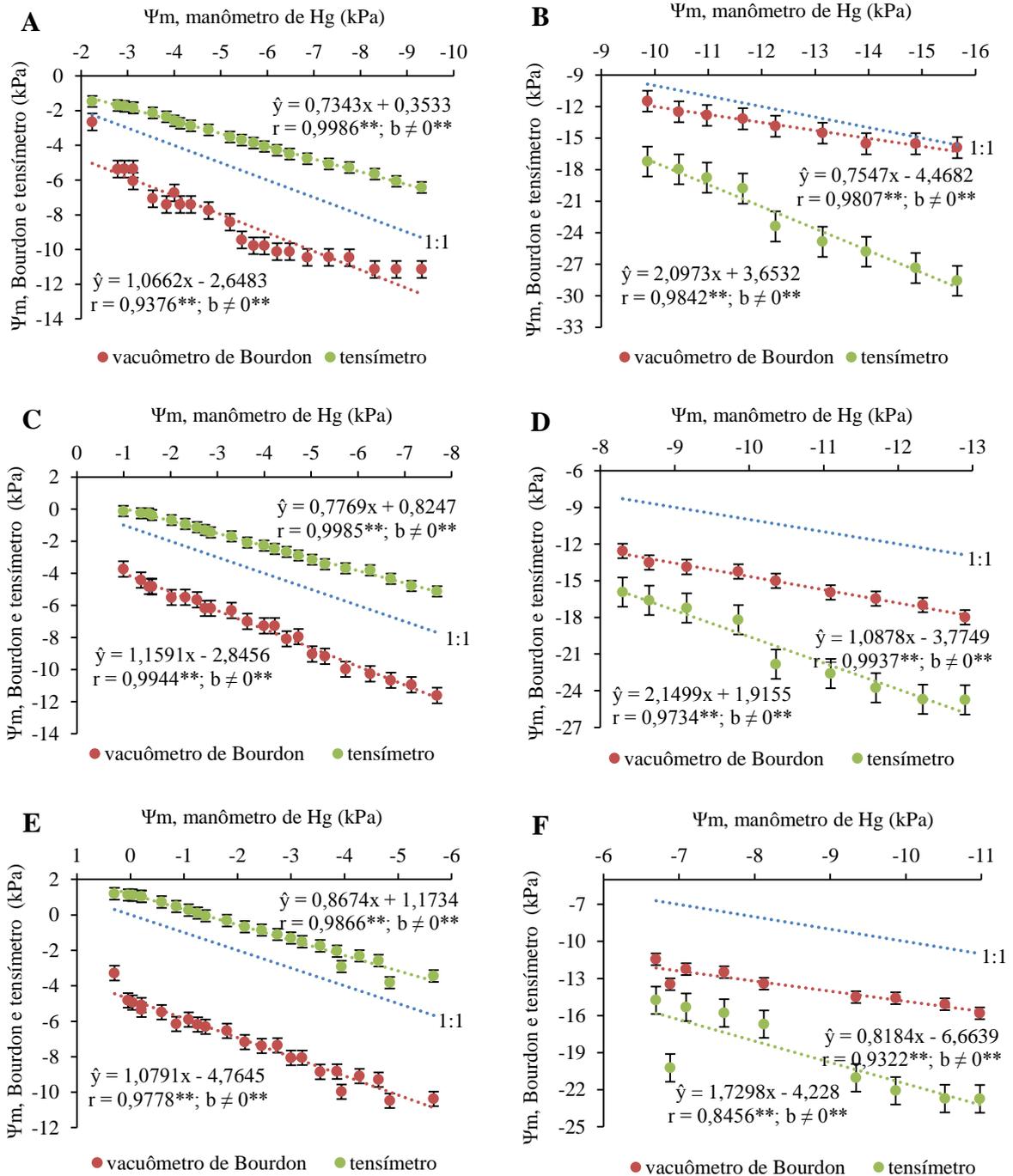
O tensímetro com transdutor precisa vencer a inércia para o perfeito funcionamento, uma vez que um diafragma no interior do instrumento precisa ser deformado para, então, um sinal elétrico proporcional à deformação, ser enviado e convertido em dígitos no display do equipamento. De acordo com Marinho, Take e Tarantino (2008), parte da variação no potencial mátrico 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, o tensímetro digital se mantém próximo ao manômetro 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 manômetro de Hg, enquanto o tensímetro se distancia, considerando as respectivas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m. Assim, é importante destacar que quanto maior o potencial matricial mais o tensímetro subestima o sistema tido como referência; ao contrário, quanto menor o potencial matricial, mais o tensímetro o superestima. Quando se observam as leituras do vacuômetro de Bourdon, quanto maior o potencial matricial mais superestima em relação ao manômetro de Hg e quanto menor o potencial mais subestima. Beraldo, Corá e Fernandes (2012), comparando tensiômetro com manômetro 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 de o tensímetro ter se distanciado do manômetro de Hg quando o solo se tornou mais seco.

Em relação às retas que relacionam o vacuômetro de Bourdon e o manômetro 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 manômetro de mercúrio; o contrário se observa quando o solo se encontra numa condição seca. 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.

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).



Fonte: Autor.

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

Fonte: Autor.

4.3 Variação da umidade entre os sistemas de leitura

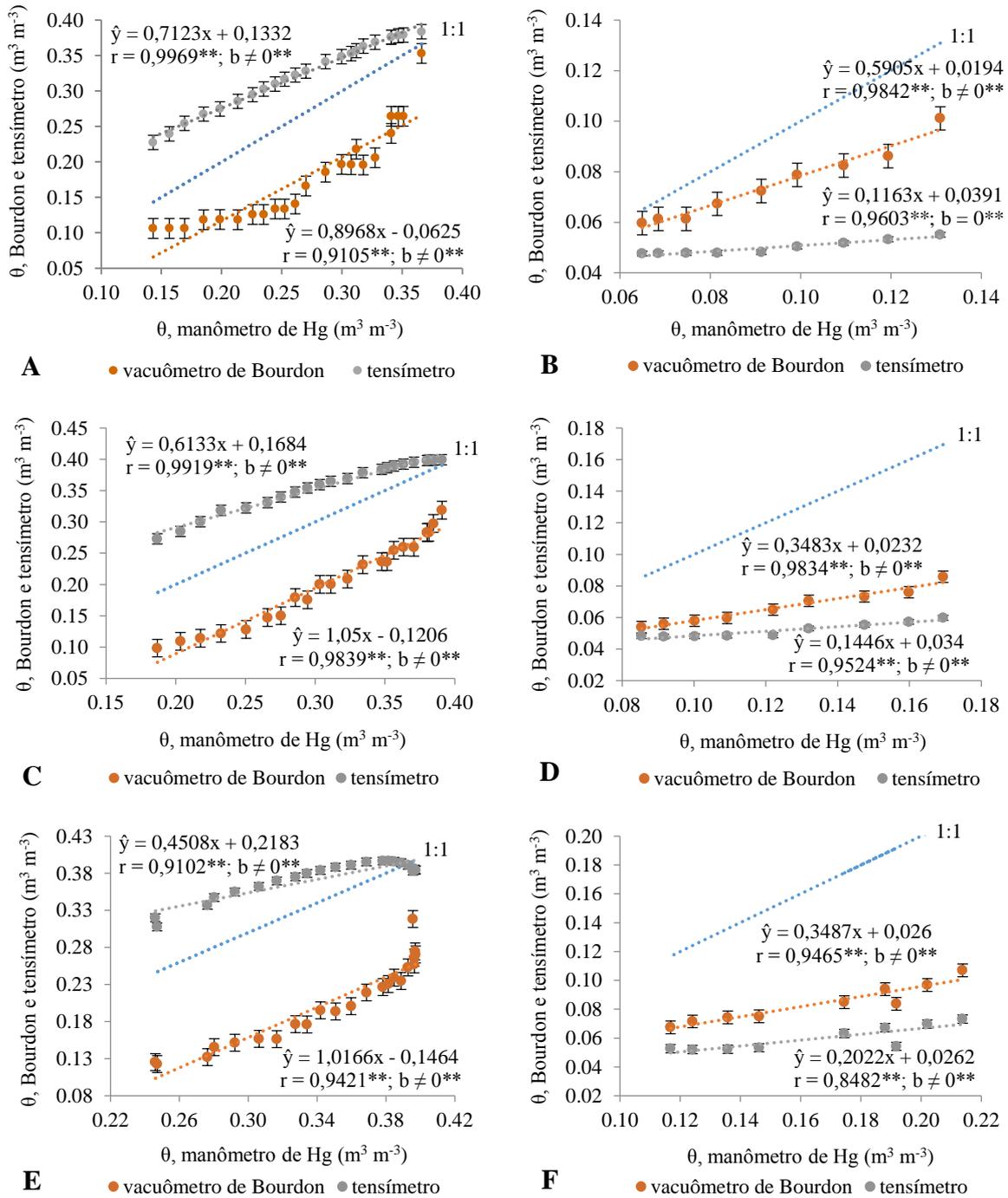
Considerando os tempos de avaliação e os valores de umidade volumétrica do solo obtidos pelos dois sistemas alternativos de leitura em relação ao sistema padrão, verifica-se que os mesmos respondem estatisticamente de maneira diferente à variação (aumento ou diminuição) nos valores de umidade volumétrica do solo (Figura 4), sendo o tensímetro o instrumento com maior aproximação em relação ao sistema padrão, registrando umidade superior para a maioria das leituras repetidas no tempo (1 a 1511 horas) e o Bourdon o que mais se distanciou, com umidade inferior em todas as leituras, comportamento semelhante para todas as profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m. Nos tempos de avaliação quando o solo encontrava-se com teor de água menor (1708 a 3052 horas), observa-se que ocorre o inverso, com umidade superior para o vacuômetro de Bourdon se aproximando do sistema padrão e umidade inferior para o tensímetro digital. Beraldo (2011), trabalhando com ciclos de umedecimento/secagem, obteve valores de umidade sempre próximos, não significativos, tanto para o manômetro de mercúrio como para o tensímetro digital de punção, instrumento de comparação, considerando o mesmo tipo de solo, denominado de Latossolo, e uma mesma profundidade de 0,20 m.

Observa-se uma correlação entre as umidades volumétricas obtidas pelos sistemas de leitura, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital com o manômetro de mercúrio

(Figura 4). O alto coeficiente de correlação para o tensímetro digital variou de 0,9969, 0,9919 e 0,9102 = 0,9663 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 = 0,9203 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 experimental nos tempos (1708 a 3052 horas) quando observados os menores coeficientes de correlação. Já para o Bourdon foi o inverso do tensímetro, com os menores coeficientes de correlação nas leituras repetidas no tempo de maior umidade (0,9105, 0,9839 e 0,9421 = 0,9455), 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 = 0,9714), 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 sistema padrão sejam tão similares a ponto de não provocarem diferenças em seus coeficientes. Assim sendo, observa-se alta relação linear entre os sistemas, com o tensímetro 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 tensímetro digital se distancia em relação ao manômetro de Hg (sistema padrão). De acordo com os valores dos coeficientes angulares, para cada unidade de umidade obtida pelo manômetro 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 mostrou-se 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 (manômetro 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.

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).



Fonte: Autor.

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 unidade 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

Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES

Após a inserção da agulha do tensímetro na câmara de ar do tensiômetro, a leitura deve ser realizada em 30 segundos;

O tensímetro pode substituir o sistema padrão na medida do potencial matricial da água no solo na faixa de umidade desde a saturação até a capacidade de campo, e o Bourdon partindo da condição na ou próxima à capacidade de campo até a situação mais seca;

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

REFERÊNCIAS

- ASSIS JÚNIOR, R. N. **Análise do desempenho do tensiômetro de câmara de ar na avaliação do potencial mátrico da água**. 1995. 85 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), Piracicaba, 1995.
- AZOOZ, R. H.; ARSHAD, M. A. Laboratory calibration of pressure transducer-tensiometer system for hydraulic studies. **Canadian Journal Soil Science**, v. 74, n. 3, p. 315-319, 1994.
- 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**, 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 "Júlio de Mesquita Filho", 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**, v. 32, n. 3, p. 467-478, 2012.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: Editora da Universidade Federal de Viçosa, 2006. 625 p.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. *In*: KLUTE A., editor. Methods of soil analysis. 2nd.ed. Madison: **American Society of Agronomy**; 1986a. Pt 1, cap. 13, p. 363-375. (Agronomy Monography, 9).
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. *In*: KLUTE A., editor. Methods of soil analysis. 2nd.ed. Madison: **American Society of Agronomy**; 1986b. Pt 1, cap. 14, p. 377-382. (Agronomy Monography, 9).
- 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**, 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**, v. 33, n. 1, p. 17-24, 2009.
- BUCHTER, B.; HINZ, C.; WYDLER, H.; FLÜHLER, H. Evaluation of temperature and bypass flow sensitivity of tensiometers in a field soil. **Geoderma**, v. 87, n. 3-4, p. 281-291, 1999.
- BUCKINGAM, E. **Studies on the movement of soil moisture**. Washington, USDA, 1907. 61 p. (Soils Bulletin, 38).

- CASSEL, D. K.; KLUTE, A. Water potential: Tensiometry. *In*: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis: Physical, chemical and mineralogical methods**. Madison: **American Society of Agronomy**, 1986. p. 563-596.
- COELHO, S. L.; TEIXEIRA, A. S. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 3, p. 536-545, 2004.
- 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). **Science Agrícola**, v. 57, p. 191-192, 2000.
- DURIGON, A.; JONG VAN LIER, Q. Determinação das propriedades hidráulicas do solo utilizando tensiômetros de polímeros em experimentos de evaporação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1271-1276, 2011.
- GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. *In*: A. Klute (Ed.); **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2nd.ed., p. 383-411, 1986. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
- HAISE, H. R.; KELLEY, O. J. Causes of diurnal fluctuations of tensiometers. **Soil Science**, v. 70, p. 301-313, 1950.
- HILLEL, D.; KRENTOS, V. D.; STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. **Soil Science**, 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**, v. 7, n. 2, p. 205-211, 1993.
- KLEIN, V. A. Uma proposta de irrigação automática controlado por tensiômetros. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 7, n. 3, p. 231-234, 2001.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. *In*: Klute A, editor. **Methods of soil analysis**. 2nd.ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America; 1986. Pt. 1, p. 635-662. (Agronomy Monography, 9).
- LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Destino da uréia aplicada a um solo tropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, p. 40-44, 1978.
- MARINHO, F. A. M.; TAKE, W. A.; TARANTINO, A. Measurement of matric suction using tensiometric and axis translation techniques. London: **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 26, n. 6, p. 615-631, 2008.
- MARTHALER, H. P.; VOGELSANGER, W.; RICHARD, F.; WIERENGA, P. J. A pressure transducer for field tensiometers. Madison: **Soil Science Society of America Journal**, 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 (ESALQ/USP), Piracicaba, 2009.

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. Campina Grande: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 58-63, 2006.

NYHAN, J. W.; DRENNON, B. J.; GAYLOR, R. M. Field evolution of a tensiometer data acquisition system for hydrologic studies of waste disposal site design. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASUREMENT OF SOIL AND PLANT WATER STATUS. Logan: **Proceedings**, v. 1, p. 145-150, 1987.

OR, D. Who invented the tensiometer? Madison: **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 1, p. 1-3, 2001.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C.; BACHI, O. O. S.; OLIVEIRA, J. C. M.; DOURADO NETO, D. A. Parameterized equation to estimate soil hydraulic conductivity in the field. Sidney: **Australian Journal of Soil Research**, v. 42, p. 283-287, 2004.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri: Editora Manole, 2012. 500 p.

SAUNDERS, L. C. U.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Condutividade hidráulica da Terra Roxa Estruturada em condições de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, p. 164-167, 1978.

SENTELHAS, P. C.; MORAIS, S. O.; PIEDADE, S. M. S.; PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 2, p. 215-221, 1997.

STEM, N.; GIRALDEZ, D. C.; MATTA, J. A. S. **Medidas de grandezas físicas**. Disponível em: <<http://www.engonline.fisp.br/1ano/fisica1/apostfisp.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2014.

TABLE CURVE 2D. **Table Curve 2D (Trial Version 5.01)**, 2014. Disponível em: <<http://www.sigmaplot.com/products/tablecurve2d/tablecurve2d.php>>. 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**, 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 temperature changes. Amsterdam: **Water Resources Research**, v. 34, n. 11, p. 2863-2869, 1998.

WATSON, K. K.; JACKSON, R. D. Temperature effects in a tensiometer-pressure transducer system. Madison: **Soil Science Society of American Proceedings**, v. 31, p. 156-160, 1967.

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