**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Abordagem metodológica envolvendo tensiometria e determinação
da curva de retenção de água num solo de textura média**

Hélio Henrique Soares Franco

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2015**

Hélio Henrique Soares Franco
Engenheiro Agrônomo

**Abordagem metodológica envolvendo tensiometria e determinação
da curva de retenção de água num solo de textura média**

Orientador:
Prof. Dr. **ALVARO PIRES DA SILVA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2015

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Franco, Hélio Henrique Soares

Abordagem metodológica envolvendo tensiometria e determinação da curva de retenção de água num solo de textura média / Hélio Henrique Soares Franco. - - Piracicaba, 2015.
55 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Tensiômetros de punção 2. Formato de cápsulas 3. Lama de solo 4. Potencial
mátrico 5. Conteúdo de água I. Título

CDD 631.432
F825a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

À minha família,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio incondicional;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e ao Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade de pós-graduação;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo;

Ao professor Dr. Alvaro Pires da Silva pela orientação, confiança e apoio durante todo o período de Mestrado;

Ao professor Dr. Paulo Leonel Libardi, pela concessão do material e uso do laboratório; também pela receptibilidade e dúvidas prontamente esclarecidas;

Ao professor Dr. Cássio Antonio Tormena, pela amizade e sugestões;

Ao laboratorista Gilmar Batista Grigolon, pelo auxílio nos testes com os tensiômetros;

Aos amigos: Ana Paula, Diogo (chaver), Edison, Gabriel, Leandro, Lorena, Márcio, Renato, Rossi e Verena, pela ajuda nas fases de implantação ou condução do experimento;

Aos amigos citados e demais amigos, pela convivência e momentos de descontração ao longo desses dois anos;

A todos que de alguma forma contribuíram para que esse trabalho fosse realizado.

AGRADEÇO!

*"Os que se encantam com a prática sem a ciência
são como os timoneiros que entram no navio sem
timão nem bússola, nunca tendo a certeza do seu
destino"*

(Leonardo da Vinci)

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 DESENVOLVIMENTO	21
2.1 Revisão bibliográfica	21
2.2 Material e Métodos	25
2.2.1 Descrição da área experimental	25
2.2.1.1 Delineamento experimental	26
2.2.2 Análises prévias ao experimento	26
2.2.2.1 Seleção e preparação dos tensiômetros	26
2.2.2.2 Testes de pressão de borbulhamento e condutância hidráulica das cápsulas	27
2.2.3 Instalação dos tensiômetros e saturação do solo	29
2.2.4 Condução do experimento	31
2.2.4.1 Determinação do Ψ e da CRA no campo	33
2.2.5 Análises posteriores ao experimento	35
2.2.5.1 Calibração do sensor de capacitância	35
2.2.5.2 Análises complementares	36
2.2.5.2.1 Análise granulométrica do solo	36
2.2.5.2.2 Densidade do solo (D_s)	37
2.2.6 Análise estatística dos dados	37
2.3 Resultados e Discussões	37
2.3.1 Pressuposições básicas	37
2.3.2 Variabilidade de alguns atributos do solo na área experimental	37
2.3.3 Tensiometria	38
2.3.4 Curva de retenção de água no solo	41
3 CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	49
ANEXO	53

RESUMO

Abordagem metodológica envolvendo tensiometria e determinação da curva de retenção de água num solo de textura média

A agricultura demanda grande quantidade de água para a produção de alimentos e fibras. Técnicas que determinem e monitorem a dinâmica da água no solo são importantes para promover o uso correto e consciente desse recurso natural. Diante do exposto, a tensiometria é uma ferramenta eficiente na determinação da dinâmica da água em solos agrícolas, podendo ser utilizada em conjunto com sensores de capacitância para a caracterização da curva de retenção de água no solo. Contudo, apesar de práticos, erros associados à instalação e às características das cápsulas podem comprometer a precisão dos tensiômetros. Esse trabalho teve como objetivo testar a influência do uso de lama de solo no momento da instalação, bem como o formato e condutância hidráulica de cápsulas de tensiômetros de punção sobre o potencial matricial da água no solo, tendo-se como referência tensiômetros com manômetro de mercúrio. Também, se objetivou determinar a curva de retenção de água no solo com base nos dados obtidos por tensiometria e de um sensor de capacitância. Os resultados mostram que o formato das cápsulas de cerâmica e a lama de solo influenciaram as determinações do potencial matricial, ao contrário da condutância hidráulica das cápsulas. A lama de solo é indicada na instalação de tensiômetros com manômetro de mercúrio e de punção. As curvas de retenção diferiram quanto aos sistemas de aquisição (manômetro de mercúrio ou tensímetro); no entanto, o modelo ajustado não foi sensível em distinguir diferenças entre os tratamentos quanto ao formato das cápsulas ou uso de lama de solo. De modo geral, ocorreu uma subestimativa dos ajustes das curvas de retenção para os tensiômetros de punção, o que pode levar a interpretações errôneas das curvas de retenção de água no solo quando determinadas por meio desses instrumentos.

Palavras-chave: Tensiômetros de punção; Formato de cápsulas; Lama de solo; Potencial mátrico; Conteúdo de água

ABSTRACT

Methodological approach involving tensiometry and determination of the water retention curve in a medium texture soil

The agriculture demand large amounts of water for food and fiber production. The techniques used to determine and monitor the water dynamics in the soil are important to promote the correct and conscious use of this natural resource. Given the above, the tensiometry is an efficient tool for the determination the water dynamics in soils, which can be used in conjunction with capacitance sensors to characterize the water retention curve in the soil. However, although practical, errors associated with the installation and the characteristics of the capsules may compromise the accuracy of tensiometers. This study aimed to test the influence of the use of soil slurry during the tensiometer installation, the format and hydraulic conductance of the capsules from puncture tensiometers on the matric potential of soil water, taking as reference tensiometers equipped with mercury manometers. In addition, aimed to determine the soil-water retention curve based on data obtained by tensiometry and a capacitance sensor. The results shows that the format of the ceramic capsules and the use of the slurry influenced the measurements of matric potential, as opposed to hydraulic conductance of the capsules. The soil slurry is recommended for tensiometers equiped with mercury manometer and puncture tensiometers. The retention curves differed among the acquisition systems (mercury manometer or tensimeter); however, the fitted model was not sensitive enough to distinguish differences between treatments for the format of the capsules or the use of soil slurry. In general, there was an underestimation of the retention curve for puncture tensiometers, which can lead to erroneous interpretations of the soil-water retention curve when determined by these instruments.

Keywords: Puncture tensiometers; Capsules format; Soil slurry; Matric potential; Water content

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Área experimental. A: construção e instalação da estrutura de madeira; B: revestimento da estrutura de madeira com fitilhos e lona plástica..... 26
- Figura 2 - Tensiômetros e formatos das cápsulas. A: tensiômetro com manômetro de mercúrio confeccionado no laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ-USP. B: formato das cápsulas dos tensiômetros utilizados no experimento (COM: cápsulas ovaladas dos tensiômetros com manômetro de mercúrio; CO: cápsulas ovaladas dos tensiômetros de punção; CP: cápsulas pontiagudas dos tensiômetros de punção)..... 27
- Figura 3 - Testes de condutância hidráulica e pressão de borbulhamento das cápsulas. A: teste de pressão de borbulhamento em tensiômetro de punção de cápsula pontiaguda. B: teste de condutância hidráulica em tensiômetro de punção de cápsula ovalada. C: teste de condutância hidráulica em cápsula de tensiômetro com manômetro de mercúrio 29
- Figura 4 - Instalação dos tensiômetros. A: trado utilizado na instalação dos tensiômetros de cápsula ovalada; B: peneiramento do solo em peneira de malha de 1,18 mm; C: confecção da lama de solo utilizada no momento da instalação dos tensiômetros 30
- Figura 5 - Saturação do solo. A: Processo de saturação do solo do experimento; B: desnível observado pelo acúmulo da água em partes da área experimental..... 31
- Figura 6 – Determinações à campo. A: conjunto de equipamentos utilizados na obtenção de dados para a determinação da CRA; B: buraco feito para a inserção da sonda de capacitância; C: guia utilizado para facilitar a inserção da sonda de capacitância no solo..... 34
- Figura 7 - Calibração do sensor de capacitância. A: Solo em anéis volumétricos de 7 cm x 7 cm utilizados na calibração do sensor de capacitância; B: Calibração do sensor de capacitância 36
- Figura 8 - Valores médios de Ψ das leituras ao decorrer do tempo. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma leitura. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD ao nível de significância de 5 % 39
- Figura 9 - Relação entre o potencial matricial medido para o tratamento padrão e demais tratamentos. A: Padrão x OSL; B: Padrão x OCL; C: Padrão x PSL; D: Padrão x PCL.. 41
- Figura 10 - Curva de retenção de água no solo para os tratamentos Padrão (A), OSL (B), OCL (C), PSL (D) e PCL (E)..... 44

Figura 11 - Regressões entre o conteúdo de água estimado e medido para os tratamentos Padrão (A), OSL (B), OCL (C), PSL (D) e PCL (E).....	46
Figura 12 - Mapa pedológico detalhado da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Precipitação referente aos meses de condução do experimento	32
Tabela 2 - Análise descritiva dos atributos utilizados na caracterização física do solo na área experimental	38
Tabela 3 - Parâmetros estatísticos dos valores de CH para os formatos de cápsulas.....	38
Tabela 4 - Valores médios de θ para as leituras ao decorrer do tempo.....	42
Tabela 5 - Equações e parâmetros estatísticos obtidos nos ajustes das CRAs.....	42
Tabela 6 - Valores do teste t aplicado aos coeficientes da CRA e valor de t tabelado	43

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural finito e o seu mau uso pode acarretar problemas irreversíveis. Além disso, o crescimento constante da população mundial demanda cada vez mais água para a produção de alimentos, tornando o futuro da agricultura incerto, uma vez que a mesma é inteiramente dependente desse recurso natural.

Com base no exposto, técnicas para determinar e monitorar a dinâmica da água em solos agricultáveis vem sendo desenvolvidas e aprimoradas ao longo dos anos, visando minimizar o impacto das atividades agrícolas sobre o uso desse recurso natural. Dentre essas técnicas, a utilização de equipamentos simples, como estufas para o secamento de amostras de solo e utilização de tensiômetros de punção de baixo custo, até a utilização de instrumentos sofisticados, como sensores de capacitância e tensiômetros eletrônicos de última geração são algumas das opções para o monitoramento da água no solo.

Os tensiômetros são equipamentos muito utilizados por serem sensíveis em determinar o potencial da água no solo. Contudo, apesar da eficiência desses equipamentos, erros associados à instalação e características das cápsulas podem comprometer as determinações e a precisão desses instrumentos.

A hipótese desse trabalho é de que alguns fatores relacionados à forma de instalação e características inerentes às cápsulas de tensiômetros de punção, comercialmente disponíveis, podem influenciar as leituras do potencial matricial da água no solo e, conseqüentemente, a determinação da curva de retenção de água.

Esse trabalho teve como objetivo testar a influência do uso de lama de solo no momento da instalação, bem como o formato e condutância hidráulica de cápsulas de tensiômetros de punção sobre o potencial matricial da água no solo e sobre a curva de retenção de água no solo, tendo-se como referência tensiômetros com manômetro de mercúrio.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura estima que o consumo de água tenha crescido no último século a um ritmo mais de doze vezes superior ao da população mundial (FAO, 2009). Segundo projeções dessa mesma entidade, para o ano de 2025 estima-se que 1,8 bilhão de pessoas viverão em países ou regiões com falta de água, sendo que dois terços dessa população poderão enfrentar a escassez total desse recurso.

Com base no exposto, a agricultura é responsável por grande parte do consumo da água no planeta (PAZ et al., 2000). Dessa forma, técnicas que possibilitem o melhor aproveitamento de uso desse recurso natural são de suma importância para a redução do desperdício e melhor eficiência de utilização da água para fins agrícolas. Nesse contexto, Lopes et al. (2004) reforçam que, ao agricultor, devem ser fornecidas técnicas simples, mas com precisão suficiente para possibilitarem, no campo, a determinação criteriosa do momento e da quantidade de água a ser aplicada. Dentre essas técnicas, a tensiometria se apresenta como uma ferramenta confiável e prática.

As primeiras abordagens sobre tensiometria se deram no início do século XX, sendo a invenção do tensiômetro para medições do potencial matricial da água no solo (Ψ) comumente atribuída a Willard Gardner, em 1922. Contudo, Or (2001), numa análise mais detalhada sobre o assunto, atribui a Burton E. Livingston, em 1908, a fabricação e os primeiros estudos envolvendo tensiometria.

Tensiômetros são usados para medir o estado de energia da solução do solo, comumente chamada de água no solo (CASSEL; KLUTE, 1986). O princípio de funcionamento do tensiômetro baseia-se na formação do equilíbrio entre a solução do solo e a água contida no interior do aparelho (COELHO; TEIXEIRA, 2004). De acordo com Reichardt e Timm (2004), esse equilíbrio ocorre devido à água do solo que, em geral, está sob pressões subatmosféricas, exercer uma sucção sobre o a cápsula do equipamento e dele retirar certa quantidade de água, causando queda na pressão hidrostática dentro do instrumento. Estabelecido o equilíbrio, o potencial da água dentro do tensiômetro se iguala ao potencial da água no solo em torno da cápsula e o fluxo de água cessa.

Embora alguns tensiômetros fabricados com materiais diferenciados consigam atingir, facilmente, Ψ superiores a 200 kPa (BAKKER et al., 2007; DIENE; MAHLER, 2007; SCHINDLER et al., 2010), para tensiômetros convencionais, como os tensiômetros de punção e manômetro de mercúrio, a faixa limite de funcionamento desses instrumentos se dá muito abaixo, normalmente em Ψ próximos de 85 kPa (BRAGA; CALGARO, 2010), sendo que acima desses potenciais pode ocorrer o fenômeno de cavitação nesses equipamentos (DIENE; MAHLER, 2007).

Apesar de limitados quanto à faixa de determinação do Ψ , os tensiômetros convencionais têm como algumas vantagens o custo relativamente baixo e maior disponibilidade comercial (SILVA, 1999). O custo entre esses equipamentos pode variar bastante, podendo ser relativamente oneroso para tensiômetros com sistemas eletrônicos de aquisição de dados (HUTCHINSON; BOND, 2001; COELHO; TEIXEIRA, 2004; GRESWELL et al., 2009). Quanto à disponibilidade comercial, esta é restrita para tensiômetros nos quais o mercúrio é utilizado. Devido à toxidez do Hg, se tem buscado tensiômetros com sistemas alternativos de medição do Ψ , como os tensiômetros de punção (BRITO et al. 2009).

De acordo com Braga e Calgaro (2010), atualmente, os tensiômetros de punção são muito utilizados por causa da facilidade de manuseio; porém, são menos precisos quando comparados aos tensiômetros com manômetro de mercúrio (MORAES et al., 2006; BRITO et al., 2009). As leituras do Ψ nos tensiômetros de punção são efetuadas de maneira simples, por meio de aparelhos denominados tensímetros, os quais possuem transdutores de pressão sensíveis em transmitir um sinal correspondente à tensão no interior dos tensiômetros no momento da leitura (MARTHALER et al., 1983; BRITO et al., 2009).

A facilidade de manuseio dos tensiômetros é um fator importante a ser considerado, principalmente para condições de campo. Além disso, fatores relacionados às cápsulas de cerâmica e à maneira de instalação dos tensiômetros também são de elevada importância para o adequado funcionamento desses instrumentos.

Em relação às cápsulas de cerâmica, Cassel e Klute (1986) ressaltam que a pressão de borbulhamento e condutância hidráulica das mesmas devem ser levadas em consideração na seleção de tensiômetros. Segundo Soccol et al. (2005), a pressão de borbulhamento é a pressão mínima requerida para forçar a passagem de

ar através da cápsula de cerâmica saturada por água, na qual o ar começa a borbulhar através de seus poros, sendo que essa pressão deve ter um valor mínimo de 100 kPa para o adequado funcionamento do equipamento. A condutância hidráulica das cápsulas porosas é definida como a quantidade de água que passa através da cápsula de cerâmica, por unidade de tempo e por unidade de diferença de pressão (SOCCOL et al., 2005). Cassel e Klute (1986) recomendam um valor padrão de condutância hidráulica na ordem de $0,003 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$, sendo que valores de condutância na ordem de $0,001 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ também são adequados para muitos trabalhos de campo. Ainda, segundo esses autores, em casos que se necessite de tempos de resposta rápidos das cápsulas de cerâmica, os tensiômetros podem ser construídos com cápsulas especiais de condutância na ordem de $0,1 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$.

O formato das cápsulas tem influência direta sobre a condutância hidráulica das mesmas, uma vez que o tempo de resposta das cápsulas pode ser comprometido caso não haja o contato adequado destas com o solo, resultando em determinações errôneas de Ψ . Embora o formato ovalado de cápsulas de cerâmica seja utilizado como padrão na confecção de tensiômetros, existem no mercado instrumentos confeccionados com cápsulas pontiagudas, sendo estas mais propícias a apresentarem erros caso o contato solo-cápsula seja insuficiente. Apesar de ser um tema importante, não são encontrados trabalhos na literatura referentes à influência direta dos formatos de cápsulas de cerâmica sobre a condutância hidráulica ou, indiretamente, sobre as determinações do Ψ .

Quanto à maneira de instalação dos tensiômetros, essa é dependente das características do solo ou substrato em que os equipamentos são inseridos. O modo convencional de instalação se dá por meio de tradagem. Sisson et al. (2002) obtiveram equilíbrio mais rápido entre os potenciais da cápsula e do solo utilizando uma técnica alternativa de instalação, entretanto, a tradagem é também bastante confiável, desde que seja efetuada sob condições adequadas. Para tal, Libardi (2005) ressalta que o solo deve estar o mais úmido possível no momento da instalação, a fim de que haja o contato necessário entre a cápsula porosa e o solo. Os equipamentos mais indicados para essa operação são os trados de rosca tipo Mathieson e de punção tipo meia-cana (MAROUELLI, 2008). Por ocasião da instalação, é essencial que o diâmetro do trado seja levemente inferior ao diâmetro da cápsula, a fim de permitir um ajuste confiável entre a cápsula e o solo na parte inferior do furo (YOUNG; SISSON, 2002). Contudo, apenas essa característica pode

não ser satisfatória. Dessa forma, para garantir que o contato solo-cápsula seja estabelecido, é indicada que seja feita uma espécie de “lama”, geralmente com o próprio solo trado, a qual é inserida ao furo antes da instalação do tensiômetro.

A utilização de “lama” é uma prática habitual em tensiometria, porém, informações quanto à característica e confecção desse material não são totalmente esclarecidas pela literatura existente. Silva (2009) sugere que uma quantidade de solo seja amontoadada ao redor do furo e que, em seguida, seja inserida água no buraco para a formação de “lama”, sendo o tensiômetro inserido posteriormente no furo. Já, Braga e Calgaro (2010) propõem o preparo de uma “lama fluida” com o solo retirado da profundidade de instalação da cápsula e posterior inserção desse material no fundo do furo. Informações mais consistentes são apresentadas por Young e Sisson (2002), onde esses autores sugerem a confecção de uma “lama pesada” (tradução literal do termo em inglês “heavy slurry”), misturando água de torneira com pó de sílica ou com o próprio solo retirado da profundidade de instalação. Para o caso de utilização do solo, os autores recomendam que o mesmo seja peneirado em malhas com abertura entre 104 μm 540 μm .

Diante do exposto, é notado que os tensiômetros, apesar de serem instrumentos de fácil utilização e praticidade, demandam atenção quanto à escolha das cápsulas e à instalação das mesmas, independentemente do formato que essas apresentem. Além disso, possíveis erros nas determinações do Ψ não devem ser atribuídos somente a esses dois fatores, principalmente em condições de campo, uma vez que fatores climáticos, como a temperatura, possuem influência direta sobre as variações de Ψ obtidos por meio de tensiômetros (Brito et al., 2014).

Além das aplicações diretas dos tensiômetros na obtenção do Ψ , esses instrumentos também podem ser utilizados em conjunto com técnicas de TDR (VAZ et al., 2002; VAN DER PLOEG et al., 2010) ou sensores de capacitância (MORGAN et al., 2001) para a obtenção da curva de retenção de água no solo (CRA).

A CRA relaciona o estado de energia da água no solo ao seu conteúdo de água (θ) (DANE; HOPMANS, 2002). Segundo Costa et al. (2008), a CRA é de suma importância, pois por meio dela é feita a determinação do conteúdo de água disponível no solo e de outras variáveis básicas à execução do manejo adequado da água de irrigação e à quantificação dos processos dinâmicos envolvendo o sistema solo-planta-atmosfera.

A metodologia convencional de determinação desta curva consiste na utilização de placas porosas de Richards para obtenção de vários pontos de equilíbrio entre Ψ e θ (Klute, 1986). De acordo com Otto e Alcaide (2001), este método apresenta algumas desvantagens, como alto custo do equipamento e número reduzido de laboratórios que o possuem, grande tempo necessário para determinação da CRA e problemas de contato hidráulico entre placa porosa e amostra de solo. Esses autores ressaltam que, possivelmente, a maior desvantagem da metodologia seja a de não representar bem as condições de campo. Dessa forma, a utilização conjunta de tensiômetros com sensores de capacitância utilizados no campo podem descrever adequadamente a CRA, sendo uma alternativa às determinações da curva em laboratório. Contudo, é preciso levar em consideração de que a calibração dos sensores geralmente se faz necessária (COSH et al., 2005; SILVA et al., 2012) para garantir a confiabilidade das determinações e correta caracterização da CRA.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Descrição da área experimental

O experimento foi conduzido numa área localizada no Campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), Piracicaba, São Paulo. A área está situada a 22°42'40" de latitude sul e 47°37'17" de longitude a oeste, apresentando relevo plano a suave ondulado com altitude média de 572 m. Segundo a classificação internacional de Köppen, o clima é caracterizado como subtropical úmido de inverno seco (Cwa), com precipitação anual média de 1.276 mm. O solo foi identificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (EMBRAPA, 2006), de acordo com o mapa de solos apresentado no Anexo A.

A área escolhida para a instalação do experimento está inserida dentro de um pomar de abacateiros, utilizado somente para fins acadêmicos e de pesquisa. O experimento foi instalado numa das ruas do pomar, as quais são submetidas a frequentes gradagens como forma de controle de plantas daninhas. Dessa forma, foi construída uma estrutura de madeira de 14 m x 4 m, a qual foi revestida por fitilhos e, posteriormente, por três camadas de lona plástica (Figuras 1A e 1B).

Figura 1 – Área experimental. A: construção e instalação da estrutura de madeira; B: revestimento da estrutura de madeira com fitilhos e lona plástica

2.2.1.1 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos inteiramente casualizados. O experimento foi composto por cinco blocos, sendo que cada bloco foi composto pelos seguintes tratamentos: tensiômetro de cápsula ovalada com manômetro de mercúrio, com utilização de lama de solo no momento da instalação (Padrão), sendo este considerado como o tratamento testemunha; tensiômetro de punção de cápsula ovalada, sem utilização de lama de solo no momento da instalação (OSL); tensiômetro de punção de cápsula ovalada, com utilização de lama de solo no momento da instalação (OCL); tensiômetro de punção de cápsula pontiaguda, sem utilização de lama de solo no momento da instalação (PSL); e tensiômetro de punção de cápsula pontiaguda, com utilização de lama de solo no momento da instalação (PCL).

2.2.2. Análises prévias ao experimento

2.2.2.1 Seleção e preparação dos tensiômetros

Os tensiômetros de punção foram adquiridos de empresas privadas que comercializam produtos na área de irrigação e os tensiômetros com manômetro de mercúrio (Figura 2A) foram confeccionados no laboratório de Física do Solo, Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ-USP. O critério de seleção dos tensiômetros para a composição dos tratamentos foi adotado com base no formato (Figura 2B) e condutância hidráulica (CH) das cápsulas.

Figura 2 – Tensiômetros e formatos das cápsulas. A: tensiômetro com manômetro de mercúrio confeccionado no laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ-USP. B: formato das cápsulas dos tensiômetros utilizados no experimento (COM: cápsulas ovaladas dos tensiômetros com manômetro de mercúrio; CO: cápsulas ovaladas dos tensiômetros de punção; CP: cápsulas pontiagudas dos tensiômetros de punção)

2.2.2.2 Testes de pressão de borbulhamento e condutância hidráulica das cápsulas

As cápsulas dos tensiômetros foram imersas em água destilada por 56 horas. Como as cápsulas dos tensiômetros de punção já estavam coladas ao corpo desses instrumentos, apenas as cápsulas e parte dos tensiômetros permaneceram submersas em água. No processo de saturação das cápsulas dos tensiômetros com manômetro de mercúrio, as mesmas foram alocadas na posição vertical num recipiente plástico, no qual foi adicionada água destilada. Durante o processo, tomou-se o cuidado para que as cápsulas fossem saturadas de fora para dentro, ou seja, a água saturasse os poros das extremidades ao centro das cápsulas. Esse processo teve por finalidade expulsar o ar que estava preso nos poros das cápsulas de cerâmica (BRAGA; CALGARO, 2010).

Os testes de condutância hidráulica e pressão de borbulhamento das cápsulas foram realizados no Laboratório de Física do Solo, Departamento de Engenharia de Biosistemas, ESALQ-USP. No que se refere aos tensiômetros de punção, algumas adaptações na metodologia para esses dois testes foram necessárias. Entretanto, para as cápsulas dos tensiômetros com manômetro de mercúrio foi seguida a metodologia descrita por Azevedo e Silva (1999), uma vez que esses tensiômetros só foram confeccionados após os referidos testes terem sido efetuados.

Para o ensaio de pressão de borbulhamento se utilizou uma junta com um anel de vedação tipo o'ringue. A junta estava conectada a uma mangueira, sendo esta conecta a um compressor de ar. Devido à impossibilidade de se acoplar a junta às cápsulas dos tensiômetros de punção, a mesma foi conectada aos tubos de acrílico da parte superior dos instrumentos, sendo estes imersos, posteriormente, numa bandeja com água destilada (Figura 3A). Após, foi aplicada a pressão de 100 kPa, conforme descrito por Cassel e Klute (1986). No caso das cápsulas dos tensiômetros com manômetro de mercúrio, a pressão foi aplicada diretamente nas cápsulas acopladas à junta.

Com o auxílio de uma haste de ferro e garras metálicas os tensiômetros de punção foram posicionados verticalmente e preenchidos com água destilada até completar totalmente o volume interno dos tensiômetros. Foram feitas duas marcas no sentido vertical no tubo de acrílico, com marcador para retroprojektor. As marcas foram feitas num espaçamento de exatamente dois centímetros. A junta foi acoplada novamente ao tubo e acrílico e a as cápsulas foram submetidas à pressão de 100 kPa, cronometrando-se o tempo necessário para que o nível de água no tubo de acrílico descesse da carga hidráulica inicial (marca superior) para a carga hidráulica final (marca inferior) (Figura 3B). O processo foi repetido três vezes para cada tensiômetro. A partir disso, calculou-se a condutância hidráulica de cada cápsula, conforme a Equação 1 descrita por Libardi (1999):

$$CH = a \ln [(10197 + H_1) / (10197 + H_2)] / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

sendo CH: condutância hidráulica das cápsulas ($\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$); a: área da seção transversal do tubo de acrílico (mm^2); 10197: pressão adicional aplicada (mm de H_2O); H_1 e H_2 : médias da carga hidráulica (mm de água) na cápsula nos tempos médios t_1 e t_2 , respectivamente; $(t_2 - t_1)$: intervalo de tempo (s) que o menisco de água leva para ir de H_1 a H_2 .

A condutância hidráulica das cápsulas dos tensiômetros com manômetro de mercúrio foi determinada num conjunto elaborado para essa finalidade (Figura 3C). Foram efetuadas três determinações por cápsula e a CH foi obtida segundo a equação 1, descrita anteriormente.

Figura 3 – Testes de condutância hidráulica e pressão de borbulhamento das cápsulas. A: teste de pressão de borbulhamento em tensiômetro de punção de cápsula pontiaguda. B: teste de condutância hidráulica em tensiômetro de punção de cápsula ovalada. C: teste de condutância hidráulica em cápsula de tensiômetro com manômetro de mercúrio

Após os testes, 40 tensiômetros de punção de cápsula ovalada e 35 tensiômetros de punção de cápsula pontiaguda foram selecionados com base na condutância hidráulica (CH) das cápsulas e submetidos a um teste estatístico de agrupamento. Para tanto, foi utilizado o pacote *biotools*, com a função *creategroups* do programa R Project (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014). Assim, com base no teste estatístico foram selecionados os 10 tensiômetros de cada grupo que apresentaram maior homogeneidade entre a CH das cápsulas para serem instalados na área experimental. Os cinco tensiômetros com manômetro de mercúrio não foram submetidos ao teste estatístico por serem confeccionados em número exato de repetições do experimento.

2.2.3 Instalação dos tensiômetros e saturação do solo

Antes da instalação dos tensiômetros no campo, os mesmos foram submetidos ao processo de sucção por meio de uma bomba de vácuo. O processo foi efetuado com as cápsulas de cerâmica dos tensiômetros imersas dentro d'água e visou eliminar possíveis bolhas que estivessem no interior das cápsulas. A pressão aplicada pela bomba de vácuo foi de aproximadamente -100 kPa.

Após a montagem da estrutura, no dia 20 de Junho de 2014 procedeu-se a instalação de 20 tensiômetros de punção e de 5 tensiômetros com manômetro de mercúrio na área experimental. Todos os tensiômetros foram instalados no centro da camada de 0-20 cm, por meio de um trado de rosca tipo Mathieson (Figura 4A). As tradagens foram efetuadas de modo que metade da cápsula ficasse abaixo do ponto estabelecido como o centro da camada, ou seja, 10 cm, e a outra metade acima do

referido ponto. As cápsulas ovaladas apresentaram diâmetro médio semelhante e as cápsulas pontiagudas apresentaram diâmetro médio da base levemente superior. Dessa forma, foram utilizados um trado de rosca para as cápsulas ovaladas e outro para as pontiagudas. Em ambos os casos os diâmetros dos trados foram levemente inferiores ao diâmetro das cápsulas, visando obter o máximo contato entre as cápsulas e o solo.

Para três tratamentos, incluso o Padrão, era previsto a utilização de lama de solo no momento da instalação dos tensiômetros. Assim, para esses tratamentos, após a tradagem o solo tradado foi peneirado em malha de 1,18 mm (Figura 4B). A malha utilizada foi uma adaptação à metodologia proposta por Young e Sisson (2002), pois a malha sugerida por esses autores mostrou-se inviável para o peneiramento do solo nas condições de campo no momento da instalação dos tensiômetros. Após, o solo peneirado foi transferido para um recipiente plástico, onde foi acrescentado 15 mL de água destilada ao recipiente por meio de uma seringa (Figura 4C). O material foi homogeneizado, com o auxílio de um palito de madeira, até a formação de uma “lama fluida”, que foi inserida no fundo do furo feito pelo trado.

Foram tradados cinco pontos extras na área experimental para quantificar o solo peneirado que foi utilizado na confecção de lama de solo em cada instalação. As amostras tradadas foram acondicionadas separadamente em recipientes plásticos e, posteriormente, secas em estufa para a determinação da massa seca das mesmas. O solo tradado utilizado na confecção da lama de solo apresentou massa média de 36,95 g.

Figura 4 – Instalação dos tensiômetros. A: trado utilizado na instalação dos tensiômetros de cápsula ovalada; B: peneiramento do solo em peneira de malha de 1,18 mm; C: confecção da lama de solo utilizada no momento da instalação dos tensiômetros

Posteriormente à instalação dos instrumentos, o solo ao redor da base dos tensiômetros foi amontoado e comprimido levemente com as mãos para evitar o fluxo preferencial de água nas paredes dos tubos de PVC dos instrumentos (YOUNG; SISSON, 2002; MAROUELLI, 2008; BRAGA; CALGARO, 2010). Também, foram inseridas capas de PVC sobre os tubos de acrílico na parte superior dos tensiômetros com o intuito de proteger os mesmos da incidência direta de radiação solar.

No dia 24 de Junho de 2014 a área foi saturada com 7 m³ de água por meio do caminhão pipa da ESALQ/USP (Figura 5A). Durante a saturação do solo foi observado o acúmulo da água, inicialmente, em partes do experimento (Figura 5B). Tal fato foi justificado pelo desnível da área. Entretanto, a quantidade de água aplicada foi suficiente para promover a saturação de toda área experimental, verificada nas leituras de potencial matricial igual a 0 kPa nos tensiômetros com manômetro de mercúrio algumas horas após a saturação.

Figura 5 – Saturação do solo. A: Processo de saturação do solo do experimento; B: desnível observado pelo acúmulo da água em partes da área experimental

2.2.4 Condução do experimento

O experimento foi conduzido entre os meses de Junho a Agosto de 2014. As determinações foram efetuadas nos dias: 20/06, 01/07, 06/08, 10/08, 21/08 e 25/08 (Tabela 1). Essas datas são apresentadas nesse trabalho como Leitura 1, Leitura 2, Leitura 3, Leitura 4, Leitura 5 e Leitura 6, respectivamente.

O maior tempo entre as determinações observado entre as Leituras 2 e 3, deveu-se ao fato de a área ter sido ressaturada no dia 8/7 com 7 m³ de água e pelas precipitações ocorridas após essa data. A ressaturação foi necessária visando corrigir um possível fluxo preferencial da água por meio dos instrumentos,

ocasionado pela precipitação ocorrida no dia 07/08. Conforme descrito no Tópico 3.4, é recomendado que o solo seja amontoado e levemente pressionado ao redor do tubo do tensiômetro, visando eliminar tal fluxo preferencial. Contudo, durante o processo de saturação a água removeu o solo amontoado ao redor dos tensiômetros, fato observado somente no dia 07/08.

Tabela 1 - Precipitação referente aos meses de condução do experimento

Dias	Precipitação (mm)		
	Meses		
	Junho	Julho	Agosto
1	-	0,0	0,0
2	-	0,0	0,0
3	-	0,0	0,0
4	-	0,0	0,0
5	-	0,0	0,0
6	-	0,0	0,0
7	-	2,6	0,0
8	-	3,9	0,0
9	-	5,7	0,0
10	-	0,4	0,0
11	-	0,0	0,0
12	-	0,0	0,0
13	-	0,0	5,3
14	-	0,0	0,0
15	-	0,0	0,0
16	-	0,0	0,0
17	-	0,6	0,8
18	-	0,4	0,0
19	-	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0
21	0,0	0,0	0,0
22	0,0	0,0	0,0
23	0,0	0,0	0,0
24	0,0	11,5	0,0
25	0,0	0,0	0,0
26	0,0	0,5	-
27	0,0	0,3	-
28	0,0	0,0	-
29	0,0	0,0	-
30	0,0	0,0	-
31	-	0,0	-

Fonte: Posto agrometeorológico. LEB - ESALQ - USP

2.2.4.1 Determinação do Ψ e da CRA no campo

O conteúdo de água e potencial matricial da água no solo foram monitorados com o uso de tensiômetros e de um sensor de capacitância (Figura 6A). O conteúdo de água foi medido utilizando o sensor de capacitância, modelo Thetaprobe ML2x, em conjunto com o sistema de aquisição de dados HH2, ambos da marca Delta-T Devices. Os tensiômetros utilizados foram descritos no Tópico 3.3.1. Para a determinação do Ψ nos tensiômetros de punção foi utilizado o tensímetro digital com transdutor de pressão, modelo A-6410, da marca Brumat Digital.

As determinações de θ foram efetuadas a uma distância de 10 cm ao redor dos tensiômetros, sendo efetuadas 6 leituras ao redor de cada tensiômetro durante a condução do experimento. Para que as hastes do sensor de capacitância fossem inseridas na mesma profundidade de instalação das cápsulas, foi necessário cavar buracos de 4 cm de profundidade (Figura 6B), uma vez que as hastes do sensor possuem comprimento de 6 cm. Assim, para cada leitura, em todos os tratamentos foi efetuada essa operação. Nos casos em que a inserção do sensor não foi possível devido ao baixo conteúdo de água no solo, utilizou-se um guia de quatro furos e uma furadeira contendo uma haste confeccionada para ser inserida no guia (Figura 6C). A haste confeccionada apresentava diâmetro levemente inferior às hastes do sensor de capacitância, visando proporcionar o contato adequado do solo com as mesmas quando inseridas nos furos.

As leituras de Ψ foram feitas no período da manhã, entre 7h e 8 h, visando reduzir o efeito da temperatura sobre as determinações, conforme Brito et al. (2014).

Os dados dos tensiômetros com manômetro de mercúrio foram obtidos medindo-se a elevação da coluna de Hg na mangueira ligada às cubetas. 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, para a transferência de tensão para o instrumento medidor. A câmara de ar mantida no interior do tensiômetro foi de $2,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, com variação de no máximo $4,8 \times 10^{-6} \text{ m}^3$.

As fluxagens (processo para eliminar as bolhas de ar) nos tensiômetros com manômetro de mercúrio foram feitas com água destilada de-aerada, obtida por meio de fervura e de-aeração por bomba de vácuo. A mesma água foi utilizada para completar o volume de água nos tensiômetros de punção, quando necessário.

Figura 6 – Determinações à campo. A: conjunto de equipamentos utilizados na obtenção de dados para a determinação da CRA; B: buraco feito para a inserção da sonda de capacitância; C: guia utilizado para facilitar a inserção da sonda de capacitância no solo

A determinação do Ψ no solo para os tensiômetros com manômetro de mercúrio e tensímetro digital com transdutor de pressão foi realizada, respectivamente, pelas equações 2 e 3:

$$\Psi = -12,6 h_{Hg} + h_c + z \quad (2)$$

em que Ψ : potencial mátrico da água no solo, m de água; h_{Hg} : altura da coluna de Hg (leitura do tensiômetro), m; h_c : altura do nível de Hg na cubeta em relação à superfície do solo, m de água; z : profundidade de instalação do centro da cápsula porosa do tensiômetro, m de água;

$$\Psi = L + 0,098 c \quad (3)$$

em que Ψ : potencial mátrico da água no solo, kPa; L : leitura do visor do aparelho, kPa; c : comprimento do tensiômetro (distância do meio da cápsula porosa até o centro do tubo de acrílico na parte superior do instrumento), cm; 0,098: fator de ajuste de unidades.

Os dados de Ψ e θ foram ajustados por meio da função não linear descrita por Ross et al. (1991), conforme a equação 4:

$$\theta = a \Psi^b \quad (4)$$

em que θ : conteúdo de água do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ψ : potencial da água no solo (kPa); a e b : coeficientes obtidos no ajuste do modelo aos dados na CRA.

Após o término do experimento, o desnível da área foi determinado em cada tensiômetro de mercúrio, por meio de uma mangueira de nível contendo água. Considerando-se que as réguas de madeira que continham as cubetas foram instaladas nas extremidades da área experimental, a determinação do desnível foi necessária para a correção da altura do nível de Hg nas cubetas em relação à superfície do solo (h_c).

Durante toda a condução do experimento foi efetuado o controle manual das plantas daninhas na área experimental, visando eliminar possíveis erros relacionados ao crescimento e absorção de água no solo por essas plantas.

2.2.5 Análises posteriores ao experimento

2.2.5.1 Calibração do sensor de capacitância

Para a calibração do sensor de capacitância, 12 cilindros volumétricos de 7 x 7 cm foram amostrados na área experimental (Figura 7A), por meio de um amostrador tipo Uhland. Em laboratório, o solo contido nos cilindros foi preparado e submetido à saturação gradual numa bandeja com água destilada. Após, procedeu-se o processo de calibração do sensor de capacitância (Figura 7B), conforme recomendado pelo fabricante (DELTA-T DEVICES, 1999). Entretanto, a calibração recomendada pelo fabricante sugere o uso de apenas uma repetição. Nesse experimento optou-se pela utilização de 12 repetições, visando reduzir possíveis erros no momento da calibração. Contudo, 4 amostras foram perdidas durante o processo. Dessa forma, a calibração foi feita com 8 amostras. Para tal, os coeficientes $a1$ e $a0$ foram obtidos individualmente em cada amostra, sendo que ao final calculou-se a média desses coeficientes, a qual foi utilizada na equação linear sugerida pelo fabricante para a correção dos valores de θ determinados nesse

experimento. Os valores de θ obtidos por meio do sensor de capacitância foram muito próximos aos valores de θ obtidos pela metodologia convencional de secamento do solo em estufa, para todas as repetições, sendo a diferença entre as determinações menores que 1%. Contudo, optou-se por utilizar os valores de θ corrigidos por meio da calibração do equipamento para se auferir maior precisão às determinações.

Figura 7 – Calibração do sensor de capacitância. A: Solo em anéis volumétricos de 7 cm x 7 cm utilizados na calibração do sensor de capacitância; B: Calibração do sensor de capacitância

2.2.5.2 Análises complementares

Além das determinações de Ψ e θ , foram coletadas amostras deformadas e indeformadas na área experimental ao término do experimento. As amostras deformadas foram amostradas exatamente nos locais em que se encontravam os tensiômetros, alocadas em sacos plásticos, secas ao ar por 48 horas e peneiradas em malha de 0,002 m. Essas amostras foram usadas na análise granulométrica do solo. As amostras indeformadas foram amostradas em cilindros volumétricos a 10 cm dos locais onde os tensiômetros foram instalados, sendo utilizadas na determinação da densidade do solo.

2.2.5.2.1 Análise granulométrica do solo

Para a caracterização textural do solo, na área experimental foram coletadas, aleatoriamente, cinco amostras deformadas de solo no centro da camada de 0-0,2 m. As amostras foram secas ao ar por 48 horas e peneiradas em malha 0,002 m.

Após, a análise granulométrica do solo foi efetuada pelo método do densímetro (CAMARGO et al., 1986).

2.2.5.2.2 Densidade do solo (D_s)

Os anéis volumétricos foram previamente medidos, em três repetições, utilizando um paquímetro digital. Em média os mesmos apresentaram 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro. A D_s (Mg m^{-3}) foi determinada pelo método do anel volumétrico, de acordo com Grossman e Reinsch (2002), a partir da razão entre a massa de solo seco a 105° e o volume do cilindro por ela ocupado.

2.2.6 Análise estatística dos dados

As variáveis Ψ , θ e CH foram submetidas à análise estatística de pressuposições básicas de distribuição normal dos resíduos pelo teste Shapiro-Wilk ($p > W > 0,05$) e à análise de variância dos dados pelo teste F ($p < 0,05$). As diferenças entre as médias de CH e Ψ foram comparadas pelo teste LSD ($p < 0,05$). Essas análises estatísticas foram realizadas por meio do programa SAS (SAS INSTITUTE, 2008).

2.3 Resultados e Discussões

2.3.1 Pressuposições básicas

As variáveis Ψ , θ e CH apresentaram distribuição normal dos resíduos pelo teste Shapiro-Wilk ($p > W > 0,05$).

2.3.2 Variabilidade de alguns atributos do solo na área experimental

Os teores de areia, silte e argila foram considerados de baixa variabilidade, representada pelos valores de CV menores que 12% (Tabela 2). Essa baixa variação é baseada na comparação entre os limites de coeficiente de variação propostos por Warrick e Nielsen (1980), que classificaram a variabilidade de atributos físicos do solo como baixa (CV menor que 12 %), média (CV entre 12 e

60%) e alta (CV maior que 60%). Tal comportamento também foi verificado para a Ds, indicando uma provável homogeneidade desses atributos na área experimental. Com base no exposto e nos valores das frações granulométricas, o solo foi classificado como sendo pertencente à classe textural franco-argilo-arenosa.

Tabela 2 – Análise descritiva dos atributos utilizados na caracterização física do solo na área experimental

Variáveis	N	Mínimo	Média	Máximo	DP	CV
Areia	5	650,20	658,12	666,70	6,67	1,01
Silte	5	82,30	90,36	98,30	6,56	7,26
Argila	5	251,00	251,52	251,80	0,33	0,13
Ds	25	1,39	1,52	1,67	0,08	5,47

N: número de observações; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); Areia, Silte e Argila (g kg^{-1}); Ds: densidade do solo (Mg m^{-3})

2.3.3 Tensiometria

A CH diferenciou-se significativamente quanto ao formato e procedência das cápsulas (Tabela 3). Os maiores valores de CH foram obtidos nas cápsulas ovaladas dos tensiômetros com manômetro de mercúrio (COM), que diferiram da CH determinada nas cápsulas ovaladas (CO) e pontiagudas (CP) dos tensiômetros de punção, sendo que estas também se diferenciaram significativamente entre si. Os valores de CH obtidos foram superiores ao valor padrão de $0,003 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$, recomendado por Cassel e Klute (1986).

Tabela 3 – Parâmetros estatísticos dos valores de CH para os formatos de cápsulas

		CH				
Tratamento	N	Mínimo	Média	Máximo	DP	CV
COM	5	0,042	0,049 A	0,057	0,006	11,21
CO	10	0,023	0,025 B	0,027	0,002	6,89
CP	10	0,004	0,005 C	0,006	0,001	11,11

COM: cápsulas ovaladas dos tensiômetros com manômetro de mercúrio; CO: cápsulas ovaladas dos tensiômetros de punção; CP: cápsulas pontiagudas dos tensiômetros de punção. CH: condutância hidráulica das cápsulas ($\text{mm}^2 \text{ s}^{-1}$); N: número de observações; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste LSD ao nível de significância de 5 %

Moraes et al. (2006), avaliando a CH de cápsulas de procedência nacional obtiveram valor de CV igual a 48,39%. Os valores de CV obtidos nesse experimento

foram muito inferiores ao valor de CV apresentado por esses autores, justificando a importância de testes estatísticos para agrupar as cápsulas por classes com base nas análises de CH, antes ou depois de se confeccionar os tensiômetros.

As variações nas leituras de Ψ durante a condução do experimento são apresentadas na Figura 8. Com exceção do tratamento PSL, foi observado um aumento gradativo de Ψ ao longo das determinações, principalmente para os tratamentos em que foi utilizada lama de solo no momento da instalação dos tensiômetros. O tratamento Padrão se diferiu dos outros tratamentos até a leitura 4, passando a se igualar estatisticamente ao tratamento OCL nas leituras subsequentes. A partir da leitura 5 os tratamentos OSL e OCL apresentaram-se estatisticamente diferentes; comportamento análogo ao observado para os tratamentos e PSL e PCL, sendo que esses passaram a diferir a partir da terceira leitura.

Figura 8 – Valores médios de Ψ das leituras ao decorrer do tempo. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma leitura. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD ao nível de significância de 5 %

Os tratamentos OSL, OCL, PSL e PCL foram comparados ao tratamento Padrão por meio de análises de regressão (Figura 9), com o intuito de se verificar qual tratamento apresentou comportamento mais próximo às leituras de Ψ em relação ao tratamento de referência. Foi observada uma maior correspondência das medidas de Ψ entre os tratamentos Padrão e OCL, evidenciada pelo elevado grau de correlação (87%) entre os mesmos e menor disparidade entre as retas de regressão e 1:1 (Figura 9B). É provável que o uso de lama de solo tenha contribuído

para melhorar o contato solo-cápsula no tratamento OCL, principalmente para menores valores de Ψ , ou seja, mais negativos. Tal fato pode ser atribuído, provavelmente, ao modo de instalação e ao formato das cápsulas desse tratamento, os quais foram semelhantes ao tratamento Padrão. Já, o tratamento OSL apresentou menor grau de correlação (71%) e maior disparidade entre a reta da análise de regressão e a reta 1:1 (Figura 9A), em comparação ao tratamento OCL. Possivelmente, a não inclusão da lama de solo na instalação dos tensiômetros tenha subestimado os valores mais negativos de Ψ nesse tratamento, apesar do mesmo apresentar formato das cápsulas similar ao do tratamento OCL. Os tratamentos de cápsulas pontiagudas (PSL e PCL) também diferiram entre si. O contato ineficiente da cápsula com o solo e a não utilização de lama de solo podem ter contribuído para o menor grau de correlação (36%) e maior disparidade entre as retas no tratamento PSL (Figura 9C). Entretanto, para o tratamento PCL (Figura 9D), é possível que o uso de lama de solo tenha influência direta sobre a similaridade do grau de correlação (71%) e disparidade entre as retas deste com o tratamento OSL, embora ambos diferissem quanto ao formato das cápsulas.

Com base no exposto, observou-se a subestimativa dos Ψ nos tensiômetros de punção, a qual foi mais acentuada para menores Ψ . Brito et al. (2009), comparando leituras de Ψ com tensímetro digital em relação a um sistema de referência com manômetro de mercúrio, observaram que essa subestimativa, relacionada à maior disparidade das retas, também tendia a aumentar para menores Ψ , embora tenham determinado valores máximos de Ψ próximos a -14 kPa. Essa tendência também foi constatada nesse experimento, para Ψ superiores aos valores apresentados por esses autores, sendo esse efeito minimizado para o tratamento OCL.

Apesar de a CH diferir para cápsulas de formatos distintos, a mesma demonstrou não ter influência direta sobre as variações de Ψ observadas entre os tratamentos relacionados aos tensiômetros de punção, em acordo com resultados obtidos por Moraes et al. (2006). Independentemente da menor CH das cápsulas verificada para o tratamento PCL, esperava-se que o mesmo apresentasse maior grau de correlação e menor disparidade entre as retas quando comparado ao tratamento Padrão; assim como ocorreu para o tratamento OCL. Além disso, os tratamentos que apresentavam cápsulas de mesmo formato e CH se diferiram para leituras mais negativas de Ψ . Dessa forma, o formato das cápsulas e a lama de solo

mostraram ter maior influência sobre as diferenças de Ψ entre os tratamentos do que a CH das cápsulas.

Figura 9 – Relação entre o potencial matricial medido para o tratamento padrão e demais tratamentos. A: Padrão x OSL; B: Padrão x OCL; C: Padrão x PSL; D: Padrão x PCL

2.3.4 Curva de retenção de água no solo

A variação de θ na área experimental durante cada leitura foi homogênea entre os tratamentos, verificada pela não significância das análises de variância (Tabela 4), com exceção das determinações efetuadas por ocasião da leitura 3.

Tabela 4 – Valores médios de θ para as leituras ao decorrer do tempo

Tratamento	θ					
	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Leitura 4	Leitura 5	Leitura 6
Padrão	0,295	0,203	0,150	0,136	0,103	0,087
OSL	0,290	0,200	0,163	0,118	0,096	0,084
OCL	0,296	0,204	0,166	0,125	0,093	0,082
PSL	0,288	0,208	0,166	0,119	0,108	0,082
PCL	0,290	0,203	0,138	0,121	0,089	0,080
Média geral	0,292	0,204	0,157	0,124	0,098	0,083
CV	1,16	1,36	7,82	5,91	7,67	3,31
P>F	0,96 ^{ns}	0,98 ^{ns}	0,03**	0,27 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,95 ^{ns}

θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); CV: coeficiente de variação (%); P>F: probabilidade do teste F da análise de variância (*: significativo a 10%, **: significativo a 5%, ***: significativo a 1%; ^{ns}: não significativo)

Os ajustes das CRAs foram altamente significativos, indicados pelos valores de P (<0,0001) apresentados na Tabela 5. O tratamento Padrão apresentou valores de F e R^2 superiores aos outros tratamentos e o menor valor de EPR. Dentre os tensiômetros de punção, foi observado uma proximidade entre os valores de F, R^2 e EPR para os tratamentos nos quais foi utilizada lama de solo (OCL e PCL). O tratamento PSL apresentou valores inferiores de F, R^2 e maior EPR em comparação aos outros tratamentos.

Tabela 5 – Equações e parâmetros estatísticos obtidos nos ajustes das CRAs

Tratamento	Equação	F	P	R^2	EPR
Padrão	$\theta = 0,4589 \Psi^{-0,3476}$	1758,48	<0,0001	0,95	0,016
OSL	$\theta = 0,2708 \Psi^{-0,2296}$	301,09	<0,0001	0,75	0,038
OCL	$\theta = 0,2774 \Psi^{-0,2119}$	390,30	<0,0001	0,81	0,034
PSL	$\theta = 0,1722 \Psi^{-0,0646}$	78,31	<0,0001	0,07	0,071
PCL	$\theta = 0,2765 \Psi^{-0,2816}$	374,19	<0,0001	0,82	0,032

F: valor do teste F; P: probabilidade; R^2 : coeficiente de determinação; EPR: erro padrão residual

Para verificar possíveis diferenças estatísticas entre os ajustes do modelo das CRAs, os coeficientes das equações foram submetidos ao teste t (GLANTZ; SLINKER, 1990) (Tabela 6).

Tabela 6 – Valores do teste t aplicado aos coeficientes da CRA e valor de t tabelado

Comparação	t_a	t_b	t tabelado
Padrão x OSL	2,873	-1,802	1,701
Padrão x OCL	2,714	-2,022	1,701
Padrão x PSL	5,332	-5,263	1,701
Padrão x PCL	2,729	-0,987	1,701
OSL x OCL	0,114	0,261	1,701
OSL x PSL	1,956	-3,272	1,701
OSL x PCL	-0,089	0,810	1,701
OCL x PCL	0,024	1,051	1,701
OCL x PSL	2,041	-2,858	1,701
PCL x PSL	1,999	-4,158	1,701

t_a e t_b são os valores de t para os coeficientes a e b da equação 4. Valores de t_a e t_b menores do que o valor de t tabelado, independentemente do sinal negativo, indicam que não há diferença estatística entre os ajustes das curvas de retenção pelo teste t

Constatou-se diferenças entre os coeficientes do tratamento Padrão em relação aos demais tratamentos, com exceção do coeficiente t_b da comparação entre os tratamentos Padrão e PCL. Essa diferenciação pode estar relacionada, possivelmente, à maior exatidão dos tensiômetros com manômetro de mercúrio (BRITO et al., 2009), o que proporcionou uma relação mais precisa entre os valores de Ψ e θ medidos, resultando num melhor ajuste do modelo para o tratamento Padrão. Em relação aos tensiômetros de punção, os coeficientes do tratamento PSL diferiram dos outros tratamentos, indicando menor eficiência do modelo quando ajustado com valores de Ψ obtidos por meio de tensiômetros de punção de cápsulas pontiagudas, instalados sem lama de solo. Observou-se a não diferenciação entre os valores dos coeficientes ajustados para os tratamentos PCL, OSL e OCL. Essa igualdade pode estar relacionada à maior proximidade entre as leituras de Ψ na faixa mais úmida de θ , o que ocasionou inflexões parecidas das CRAs entre esses tratamentos. No entanto, apesar da igualdade estatística entre alguns ajustes, foi verificada uma ampla variação nas leituras de Ψ entre os tratamentos avaliados para uma faixa similar de θ (Figura 10).

Figura 10 – Curva de retenção de água no solo para os tratamentos Padrão (A), OSL (B), OCL (C), PSL (D) e PCL (E)

Embora as variações de Ψ sejam claramente visíveis nas CRAs dos tensiômetros de punção OSL, OCL e PCL (Figuras 10B, 10C, e 10E, respectivamente), as mesmas não foram suficientes para diferir esses tratamentos quanto aos ajustes do modelo. O tratamento PSL foi o único a se diferenciar dos demais tratamentos em relação à caracterização da CRA, dentre os tensiômetros de punção. Tal fato se deu pelos valores discrepantes verificados ao longo das leituras de Ψ (Figura 10D). Com base na similaridade visual das CRAs dos tratamentos OCL (Figura 10C) e Padrão (Figura 10A), esperava-se que as mesmas não diferissem quanto aos ajustes, uma vez que esses tratamentos tiveram variações de Ψ muito semelhantes ao longo das determinações. No entanto, foi observada diferenciação do ajuste da CRA do tratamento Padrão com os outros tratamentos, evidenciando que a forma de aquisição de dados (tensímetro ou manômetro de mercúrio) teve maior influência sobre os ajustes do modelo, do que o formato de cápsulas ou uso de lama de solo.

A subestimativa do modelo para a faixa de maiores valores de θ (Figura 11) pode ter sido a causa da diferenciação entre os tensiômetros de punção e manômetro de mercúrio. Observa-se que a subestimativa foi muita reduzida para o tratamento Padrão, verificada pelo maior coeficiente de determinação e maior aproximação da linha de tendência à reta 1:1 (Figura 11A). Embora os tratamentos OCL (Figura 11C) e PCL (Figura 11E) apresentassem maior coeficiente de determinação em relação ao tratamento OSL (Figura 11B), observou-se que a subestimativa de θ foi semelhante para esses tratamentos. O tratamento PSL apresentou a maior subestimativa do modelo dentre todos os tratamentos (Figura 11D).

Figura 11 – Regressões entre o conteúdo de água estimado e medido para os tratamentos Padrão (A), OSL (B), OCL (C), PSL (D) e PCL (E)

3 CONCLUSÕES

O formato da cápsula de cerâmica e a lama de solo influenciaram as determinações do Ψ , principalmente para potenciais mais negativos.

A CH das cápsulas não afetou diretamente as determinações do Ψ .

A lama de solo é indicada para a instalação de tensiômetros com manômetro de mercúrio e de punção.

As CRAs diferiram quanto aos sistemas de aquisição de dados (manômetro de mercúrio ou tensímetro), no entanto, o modelo de ajuste utilizado não foi sensível em distinguir diferenças entre os tratamentos quanto ao formato das cápsulas ou uso de lama de solo.

Ocorreu uma subestimativa dos ajustes das CRAs para os tensiômetros de punção, em condições de maiores valores de θ ; o que pode levar a interpretações errôneas das curvas de retenção quando determinadas por meio desses instrumentos.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, J.A. de; SILVA, E.M. da. **Tensiômetro**: dispositivo prático para controle da irrigação. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. 33p. (Circular Técnica)

BAKKER, G.; PLOEG, M.J. van der; de ROOIJ, G.H.; HOOGENDAM, 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, p.196–202, 2007.

BRAGA, M.B.; CALGARO, M. **Uso da tensiometria no manejo da irrigação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. 30p.

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, p.17-24, 2009.

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.

CAMARGO, O.A de; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solo do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: IAC, 1986. 94p. (IAC. Boletim técnico, 106)

CASSEL, D.K.; KLUTE, A. Water potential: tensiometry. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**, 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 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**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.536-545, 2004.

COSH, M.H.; JACKSON, T.J.; RAJAT BINDLISH, R.; FAMIGLIETTI, J.S.; RYU, D. Calibration of an impedance probe for estimation of surface soil water content over large regions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.311, p.49–58, 2005.

COSTA, W.A.; OLIVEIRA, C.A.S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.515-523, 2008.

DANE, J.H.; HOPMANS, J. W. Water Retention and Storage. In: DANE, J.H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 2002. pt.4, p.671-757.

DELTA-T DEVICES. **ThetaProbe soil moisture sensor – ML2x**: user manual. Cambridge: Delta-T Devices, 1999. 22p.

DIENE, A.A.; MAHLER, C.F. Um instrumento para medida de potencial matricial nos solos sem ocorrência de cavitação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p.1261-1270, 2007.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 2006. 306p.

FAO – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. **Dia mundial da água**. 2009. Disponível em: <<http://www.fao.org.br/h2o.asp>>. Acesso em: 5 mai. 2014.

GLANTZ, S.A.; SLINKER, B.K. **Primer of applied regression and analysis of variance**. New York: McGraw-Hill, 1990. 777p.

GRESWELL, R.; ELLIS, P.; CUTHBERT, M.; WHITE, R.; DURAND, V. The design and application of an inexpensive pressure monitoring system for shallow water level measurement, tensiometry and piezometry. **Journal of Hydrology**, Amsterdam v.373, p. 416–425, 2009.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 2002. pt. 4, p.201-225.

HUTCHINSON, P.A.; BOND, W.J. Routine measurement of soil water potential gradient near saturation using a pair of tube tensiometers. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.39, p.1147-1156, 2001.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. p.635-662.

LIBARDI, P.L. **Determinação da condutância hidráulica e da pressão de borbulhamento de cápsulas porosas para tensiômetros**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1999. (Nota de Aula).

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335p.

LOPES, A.S; PAVINI, L.C.; CORÁ, J.E.; ZANINI, J.R.; MIRANDA, H.A. Manejo da irrigação (balanço hídrico climatológico) para a cultura do feijoeiro em sistemas de cultivo direto e convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.1, p.89-100, 2004.

MARQUELLI, W.A. **Tensiômetros para o controle de irrigação em hortaliças**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2008. 15p. (Circular Técnica).

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, p.624-627, 1983.

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

MORGAN, K.T.; PARSONS, L.R.; WHEATON, T.A. Comparison of laboratory- and field-derived soil water retention curves for a fine sand soil using tensiometric, resistance and capacitance methods. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.234, n.2, p.153-157, 2001.

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

OTTO, S.R.L.; ALCAIDE, M. Utilização do método TDR-tensiômetro na obtenção da curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.2, p.265-269, 2001.

PAZ, V.P.S.; TEODORO, R.E.F; MENDONÇA, F.C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.465-473, 2000. (Comunicado Técnico).

PLOEG, M.J. van der; GOOREN, H.P.A.; BAKKER, G.; HOOGENHAM, C.W.; HUISKES, C.; KOOPAL, L.K.; KRUIDHOF, H.; ROOIJ, G.H. de. Polymer tensiometers with ceramic cones: direct observations of matric pressures in drying soils. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, Munich, v.14, p.1787-1799, 2010.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em: 2 abr. 2014.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 2004. 478p.

ROSS, P.J.; WILLIAMS, J.; BRISTOW, K.L. Equations for extending water-retention curves to dryness. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.55, n.4, p.923-927, 1991.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT software version 9.2**. Cary, 2008.

SCHINDLER, U.; DURNER, W.; UNOLD, G. von; MÜLLER, L. Evaporation method for measuring unsaturated hydraulic properties of soils: extending the measurement range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.74, n.4, p.1071-1083, 2010.

SILVA, A.A.G. da; **Material didático para o curso prático de "Agrometeorologia aplicado à otimização do uso da água na irrigação"**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009. 103p.

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

SISSON, J.B.; GEE, G.W.; HUBBELL, J.M.; BRATTON, W.L.; RITTER, J.C.; WARD, A.L.; CALDWELL, T.G. Advances in tensiometry for long-term monitoring of soil water pressures. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.1, p.310–315, 2002.

SOCCOL, O.J; CARARO, D.C; SILVA, E.F.F.; ULLMANN, M.N. Condutância hidráulica e tempo de resposta de tensiômetros utilizados em cultivos fertirrigados. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.4, n.1, p.3-10, 2005.

VAZ, C.M.P.; HOPMANS, J.W.; MACEDO, A.; BASSOI, L.H.; WILDENSCHILD, D.; Soil water retention measurements using a combined tensiometer-coiled time domain reflectometry probe. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.1752-1759, 2002.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p.319-344.

YOUNG, M.H; SISSON, J.B. Water Potential. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. 3nd ed. Madison: Soil Society of America, 2002. pt.4, p.575-606.

ANEXO

ANEXO A

Figura 12 – Mapa pedológico detalhado da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ