

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

**Curva de retenção de água no solo determinada a partir de um  
número mínimo de pares de umidade e tensão na câmara de  
Richards**

**Gilmar Batista Grigolon**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração:  
Irrigação e Drenagem

**Piracicaba  
2013**

Gilmar Batista Grigolon  
Bacharel em Ciência da Computação

**Curva de retenção de água no solo determinada a partir de um número mínimo  
de pares de umidade e tensão na câmara de Richards**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **MARCOS VINÍCIUS FOLEGATTI**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração:  
Irrigação e Drenagem

**Piracicaba  
2013**

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

Grigolon, Gilmar Batista

Curva de retenção de água no solo determinada a partir de um número mínimo de pares de umidade e tensão na câmara de Richards / Gilmar Batista Grigolon. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.  
82 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Água do solo 2. Análise do solo 3. Curva de retenção 4. Física do solo 5. Irrigação  
I. Título

CDD 631.43  
G857c

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

## **Dedico**

Aos meus pais,

Mário Grigolon e Clarisse Guion Grigolon, que sempre lutaram muito para financiar meus estudos, apesar de todas as dificuldades sempre se esforçaram para me proporcionar o melhor.

A minha esposa, Flávia Boldrin Dechen, pela convivência diária e pela paciência de sempre. Juntos, conseguimos vencer os obstáculos. Obrigado pelo apoio, compreensão, amor, amizade e carinho... EU TE AMO!!!!

Aos meus queridos “ANJINHOS”, Guilherme e Heitor, que sempre me deram momentos de muita alegria e que são sem dúvida nenhuma o propósito maior de seguir meus estudos.

## **Ofereço**

Aos meus irmãos,

Gerson Aparecido Grigolon e Rosemeire Cristina Grigolon, que nos momentos difíceis sempre me ajudaram, me deram apoio e rezaram por mim.

A minha sogra Valda Boldrin Dechen, e a meus cunhados pela ajuda e carinho de sempre para conosco e com nossos filhos. Obrigado!!!



## AGRADECIMENTOS

À Deus, nosso pai;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Biossistemas e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade e suporte concedidos;

Ao Prof. Dr. Marcos Vinícius Folegatti, um amigo que conquistei ao longo desses vinte e quatro anos em que estamos trabalhando juntos. Sempre me apoiou nas decisões, me ensinou e me incentivou a estudar. Certamente, sem a sua participação e apoio este trabalho não seria possível. Pela franqueza, lealdade, amizade, orientação e acima de tudo pela confiança depositada em mim.

Ao Prof. Dr. Tarlei Ariel Botrel pelo incentivo, amizade e pelos conselhos que com certeza levo para toda a vida. Aos Professores Dr. Sérgio Duarte Nascimento e Jarbas Honório de Miranda, pelos ensinamentos, pelo apoio e pelas brincadeiras.

Aos meus amigos e funcionários do Departamento de Engenharia Rural, Paula Alessandra Bonassa Pedro, Sr. Antonio Agostinho Gozzo (Tatão), Hélio Toledo Gomes, Luís Custódio de Camargo, Osvaldo Rettore Neto, Yvan Jaoude, Sandra Regina T. Silveira Mello, Beatriz Regina Duarte Novaes, Davilmar Aparecida D. Collevatti, Marinaldo Ferreira Pinto, Antonio Pires de Camargo e Lino Stênico, pela amizade e auxílio na realização deste trabalho.

As minhas companheiras do Departamento de Ciências Exatas, Marina e Renata, pela contribuição no trabalho.

Aos meus amigos João Lelis Neto (5S) e Osvaldo Retore Neto, pelos incentivos, pela ajuda, e principalmente pela amizade que selamos a longo desses anos.

Aos meus companheiros de turma e amigos, Carlos José Gonçalves de Souza Lima, Adriano Valentim Diotto, Roque Emmanuel da Costa de Pinho e Cícero Renê A. Barboza Júnior pela grande ajuda na realização deste trabalho.

As demais pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.



*“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Não importam quais sejam os obstáculos e as dificuldades, se estamos possuídos por uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho”.*

**(Dalai-Lama)**



## SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT .....	13
LISTA DE FIGURAS.....	15
LISTA DE TABELAS .....	17
1 INTRODUÇÃO .....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.2 O solo.....	23
2.2.1 Densidade das Partículas .....	24
2.2.2 Densidade do Solo.....	25
2.2.3 Porosidade do Solo.....	26
2.2.4 Microporosidade do Solo .....	26
2.2.5 Macroporosidade do Solo .....	27
2.3 Curva de retenção da água no solo .....	27
2.3.1 A Influência da temperatura na curva de retenção de água no solo. ....	30
2.3.2 A Influência da estrutura e textura do solo na curva de retenção de água .....	31
2.3.3 Análise Granulométrica do Solo .....	32
2.3.4 Método da Pipeta.....	34
2.3.5 Método do hidrômetro.....	35
2.4 Métodos para a determinação da Curva de Retenção.....	36
2.4.1 Método da câmara de pressão de Richards .....	36
2.4.2 Método da Centrifuga .....	37
2.4.3 Método WP4 (Dewpoint Potentia Meter).....	38
2.4.4 Método do funil de Haines e mesa de tensão.....	39
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.2 Localização e caracterização experimental .....	41
3.3 Preparo do solo.....	42
3.4 Análise granulométrica .....	43
3.5 Curva de Retenção de Água no Solo.....	46
3.5.1 Características e preparação dos anéis.....	46
3.5.2 Acomodação do Solo nos anéis .....	47
3.5.3 Saturação das amostras .....	48
3.5.4 Determinação dos pontos de umidades da curva de retenção .....	49
3.5.5 Determinação dos parâmetros da curva de retenção e índices estatísticos ...	53

3.5.6	Número de pontos e distribuição na curva de retenção .....	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	59
5	CONCLUSÃO .....	71
	REFERÊNCIAS .....	73

## RESUMO

### **Curva de retenção de água no solo determinada a partir de um número mínimo de pares de umidade e tensão de água no solo na câmara de Richards**

O conhecimento do comportamento físico-hídrico do solo é fundamental para sua caracterização. Dentre elas, a determinação da curva de retenção de água é o processo que costuma ser mais oneroso e demorado. Várias tentativas estão sendo estudadas no sentido de minimizar custo e tempo para a obtenção desta curva. A escolha do número e da combinação de pontos, ou seja, dados de umidade e correspondente tensão da água no solo, utilizados para a determinação da curva de retenção, normalmente é feita de forma arbitrária, contudo, a demora na obtenção da curva de retenção, aliada ao valor considerado alto para pequenos irrigantes, são na maioria das vezes, um empecilho para que o agricultor realize esta análise. O objetivo deste trabalho foi definir o menor número e a melhor combinação de pares de umidade e tensão de água no solo que resulte na descrição de uma curva de retenção de água do solo confiável. Para a realização da pesquisa, foram utilizados dois tipos de solos com granulometrias distintas, (arenoso e argiloso). Foram realizadas nove repetições, para cada tipo de solo, as quais foram submetidas a diferentes tensões pelo método da câmara de Richards e ajustadas pelo modelo de van Genuchten. Realizaram-se curvas contendo 4, 5, 7, 8, 9, 10 e 13 pontos de tensão, sendo que a curva que contém 13 pontos foi adotada neste estudo como referência (A1) na comparação com as demais. A análise estatística foi gerada inicialmente sobre os dados brutos das umidades do solo observadas para todas as repetições, calculando-se os coeficientes de variação para os parâmetros do modelo de van Genuchten. Posteriormente, entre os dados observados e ajustados pelo modelo, foram determinados índices estatísticos comparativos. Finalmente, os parâmetros obtidos de vários pares de umidade e correspondente tensão de água no solo obtidos na câmara Richards foram comparados aos parâmetros equivalentes da curva referência (A1) e submetidos à análise de variância (teste F), e suas médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5%. A curva de retenção de água no solo com 7 pontos, elaborada com as tensões 0, 40, 100, 300, 1.000, 5.000 e 15.000 hPa, foi a que mais se aproximou da curva de referência A1, não apresentando diferença estatística em nenhum dos parâmetros do modelo.

Palavras-chave: Física de solo; Análise de solo; van Genuchten



## ABSTRACT

### **Soil water retention curve determined by a minimum number of water content and water potential pairs in Richards' chamber**

The knowledge of the soil hydrophysical behavior is critical for characterizing its physical properties. Among them, the determination of the soil water retention curve is often the most expensive and the most time consuming. Many attempts have been tried in order to minimize the cost and the time to obtain this curve. The choice of number and combinations of points to be taken, i.e., water content and its corresponding water potential in soil, used to determine the soil water retention curve, is usually made arbitrarily, however, the delay in obtaining the curve, coupled with the cost considered high to small irrigators, are mostly an obstacle for the farmer to carry out this analysis. The objective of this work was to define the smallest number and the optimal combination of water content and water potential pairs that result in a trustable soil water retention curve. To carry out this research, two types of soils with contrasting textures were used (sandy and clay soil). For each type of soil, nine repetitions were submitted to different tensions by the Richards chamber method and adjusted by the equation of van Genuchten. Curves with 4, 5, 7, 8, 9, 10 e 13 tension points were made, taking the 13-point curve as a standard (A1) in comparison to the others. Initially, the statistical analysis was performed on the raw data of the observed water contents for all the repetitions, calculating the variation coefficient for the van Genuchten equation parameters. Subsequently, statistical indices of comparison were used between the observed and adjusted data. Lastly, the obtained parameters for different pairs of water content and its corresponding water potential in Richards' chamber were compared to the equivalent parameters of the standard curve (A1) and submitted to the analysis of variance (F test), and their mean values were compared by the Scott-Knott test (5% of probability). The 7-point soil water retention curve, using the tensions of 0; 40; 100; 300; 1,000; 5,000 e 15,000 hPa, was the closest one to the standard curve A1, showing no statistical difference in any parameters of the model.

Keywords: Physical soil; Soil analysis; van Genuchten



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Amostra de solo indicando as frações de sólido, líquido e gasoso (REICHARDT e TIMM, 2004) .....	24
Figura 2 - Diagrama esquemático do hidrômetro da ASTM, modelo 152 H .....	36
Figura 3 - Disposição das amostras no interior da centrífuga .....	37
Figura 4 - Water Potential Meter (a), com vista da parte interna e detalhes da câmara de leitura (b), equação para estimar a energia da água retida no solo (c) .....	39
Figura 5 - (A) Representação esquemática do Funil de Haines; (B) mesa de tensão .....	40
Figura 6 - Vista da Fazenda Areão e do ponto de coleta do solo argiloso .....	41
Figura 7 - Vista do ponto de coleta do solo arenoso .....	42
Figura 8 - Peneira malha abertura 2,00 mm .....	43
Figura 9 - Balança analítica utilizada para pesagem do solo .....	43
Figura 10 - Detalhe da mesa agitadora horizontal .....	44
Figura 11 - (A) Agitação da solução do solo; (B) Introdução do hidrômetro na solução do solo .....	45
Figura 12 - Triângulo de classificação textural de solos segundo Santos et al. (2005) .....	46
Figura 13 - (A) Anel de Koppek; (B) Acomodação do Perflex .....	47
Figura 14 - Etapas do preparo das amostras .....	48
Figura 15 - Processos de saturação das amostras de solo .....	48
Figura 16 - (A) Conjunto de mesas de tensão e detalhe mesa de tensão. (B) Acomodação das amostras sobre o papel filtro .....	50
Figura 17 - Sistema de controle de pressão e câmara de Richards .....	50
Figura 18 - (A) Placa de 1.000 hPa; (B) Placa de 5.000 hPa e (C) Placa de 15.000 hPa respectivamente .....	51
Figura 19 - (A) Manômetro de mercúrio; (B) manômetro analógico .....	52
Figura 20 - Estufa elétrica utilizada para secagem do solo .....	53
Figura 21 - Software RETC – Utilizado para gerar os parâmetros das curvas de retenção .....	54
Figura 22 - Índices estatísticos obtidos de médias de nove repetições do solo arenoso (A) e argiloso (B) .....	64

- Figura 23 - Gráficos das comparações de dados observados e estimados do teor de água ( $\theta$ ) das curvas de retenção de água no solo; A= 13 pontos(A1); B= 10 pontos; C= 9 pontos; D= 8 pontos; E= 7 pontos; F= 5 pontos e G= 4 pontos ..... 65
- Figura 24 - Curvas de retenção de água no solo que não diferem estatisticamente (A e C) e que diferem (B e D) da curva de referencia (A1) pelo teste F ( $p<0,01$ ) para ambos os solos ..... 68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios de três repetições dos teores de argila, silte e areia dos solos, utilizados na elaboração das curvas características de retenção de água do solo .....	46
Tabela 2 - Limites de qualificação para o índice de desempenho .....	57
Tabela 3 - Número e distribuição dos pontos nas curvas de retenção avaliadas no experimento para os dois tipos de solo .....	58
Tabela 4 - Parâmetros estatísticos obtidos da média de 9 repetições dos dados observados utilizados para caracterização da curva de retenção referência .....	60
Tabela 5 - Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água, gerados a partir de dados observados de 9 repetições segundo modelo de van Genuchten (1980), para diferentes solos, determinados pelo procedimento de regressão não linear, utilizando diversas combinações entre número e pares de pontos de tensão e umidade de água no solo .....	62
Tabela 6 - Valores médios dos parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) utilizados para estimativa da umidade no solo arenoso, levando-se em conta diferentes combinações e números de tensões.....	66
Tabela 7 - Valores médios dos parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) utilizados para estimativa da umidade no solo argiloso, levando-se em conta diferentes combinações e números de tensões.....	67



## 1 INTRODUÇÃO

A curva de retenção de água do solo expressa a relação entre a umidade do solo, seja ela com base em massa ou volume, e o seu potencial mátrico correspondente (CHILDS, 1940). O conhecimento deste parâmetro é extremamente importante nos estudos que envolvam água no solo. Sua determinação, efetuada com auxílio da câmara de Richards no laboratório, baseia-se na determinação da umidade do solo e sua correspondente tensão de água no solo. Com base nesses pares de dados, é traçada uma curva para representar as características de retenção da água do solo, ou seja, a correlação entre a umidade e a tensão com que a água está retida no solo.

A curva de retenção de água do solo é essencial para o estudo das relações solo-água ou solução do solo, uma vez que a água presente no solo está ocupando os espaços porosos.

Dentre as metodologias mais utilizadas para obtenção da curva de retenção, está o método descrito por Richards (1965), que se utiliza de câmeras de pressão. Este método é considerado o método padrão para a determinação da curva de retenção de água no solo e, portanto, um dos mais utilizados para este tipo de análise (LUCAS, 2010).

Alguns atributos do solo podem influenciar diretamente na retenção de água, com maior ou menor intensidade, dentre esses, podemos destacar a distribuição relativa do tamanho, da forma e do arranjo das partículas do solo (SALTER E WILLIAMS, 1966), (REEVE et al., 1973) e (SHARMA E UEHARA, 1968), a umidade do solo, a estrutura, o tamanho e distribuição dos poros, o conteúdo de matéria orgânica e os óxidos de ferro livre (KLUTE, 1986). Outro atributo muito importante que tem sido objeto de estudos é a textura do solo, responsável por exercer forte influência nas características da sua curva de retenção de água. Martinez et al. (1995) e Carvalho et al. (2000), consideram este atributo como um dos mais relevantes.

Outros fatores como temperatura e histerese também foram objetos de vários estudos e podem “mascarar” resultados obtidos na determinação da curva de retenção da água no solo (MORAES et al., 1993). Fatores como o manuseio constante das amostras de solo durante a obtenção dos dados de umidade para a

determinação da curva de retenção, poderá acarretar baixa qualidade dos resultados (SILVA et al., 2006).

Contudo, um dos fatores considerados importantes na caracterização da curva de retenção de água no solo é a determinação de um número mínimo de pares de umidade e tensão de água no solo, sem que haja prejuízo na sua caracterização. Alguns trabalhos mostram que ainda não foram estabelecidos critérios para obtenção desses pares de dados, sendo comum o uso de seis a oito pares, incluindo o conteúdo de água do solo na saturação (SILVA et al., 2006). Já a Embrapa (1997), recomenda para a determinação da curva de retenção de água no solo pelo processo da câmara de Richards 5 pares de pontos, nas tensões: 100, 330, 1.000, 5.000 e 15.000 hPa.

Dexter et al. (2007) e Machado et al. (2008), em trabalhos que se utilizaram da curva de retenção de água no solo, a elaboraram utilizando 11 pares de dados de umidade e tensão de água no solo, enquanto Blainski et al. (2008) e Silva et al. (2008) utilizaram 12 pares para sua determinação. No entanto, ainda são muitas as dúvidas no que diz respeito ao número de pares de umidade e tensão da água no solo para a confecção da curva de retenção, tendo em vista principalmente a heterogeneidade dos solos do Brasil. Silva et al. (2006) em trabalho com solo do cerrado brasileiro concluíram que são necessários oito pares de umidade e tensão de água no solo para se determinar a curva de retenção do solo em questão.

É fato, no entanto, que quanto maior o número de pares de dados que forem realizadas para determinação da curva de retenção de água no solo, maior será o tempo gasto na obtenção dos dados e mais onerosa será sua determinação (HODNETT; TOMASELLA, 2002; SILVA et al., 2006). Para tanto, alguns trabalhos tem apontado no sentido de priorizar pontos de baixa tensão de água no solo, visto que estes pontos são obtidos com maior rapidez, pois as amostras de solo atingem o equilíbrio físico-hídrico em menor tempo quando submetidas às menores tensões ( $\leq 100$  hPa), em relação às maiores tensões ( $> 100$  hPa), (MACHADO et al., 2008), (SILVA et al., 2008) e (TORMENA et al., 2008). Desse modo, para determinação da curva de retenção de água no solo em menor tempo, deve-se priorizar, na medida do possível, um número maior de pontos em tensões menores de água no solo.

A utilização arbitrária de determinados pares de umidades e tensões de água no solo, sem um critério de seleção definido, pode resultar em uma estimativa da curva de retenção de água no solo não representativa (JORGE et al., 2010).

O presente trabalho tem como objetivo analisar estatisticamente qual o menor número de pares de dados de umidade e tensão de água no solo, que permita caracterizar curvas de retenção de água em dois tipos de solo.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.2 O solo

O termo solo na engenharia agrônômica refere-se à camada externa e agricultável da superfície terrestre. Sua origem é a rocha que, por ação de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, se transformou, no decorrer das eras geológicas, em material poroso de características peculiares (REICHARDT e TIMM, 2004).

O solo é, portanto, um material poroso que armazena líquidos e gases em seus poros. O tamanho do espaço entre os poros do solo é consequência do arranjo de suas partículas sólidas.

A parte sólida do solo constitui-se de material mineral e orgânico. A parte mineral provém da rocha da qual o solo se formou e a parte orgânica é constituída por organismos vivos e resíduos de plantas e animais em diferentes estágios de decomposição.

A parte líquida do solo é uma solução aquosa de sais minerais e substâncias orgânicas que é retida nos poros em graus variáveis de persistência variando de um solo para outro. Parte da água do solo é utilizada pelas plantas e outra grande parte permanece no solo ou é drenada para camadas mais profundas. A reposição desta água se dá através da chuva ou por irrigação advinda de práticas agrícolas.

O espaço poroso que não está preenchido com água é ocupado pela fração gasosa constituída de ar modificado, o qual apresenta um alto nível de  $\text{CO}_2$  e pouco  $\text{O}_2$  (REICHARDT e TIMM, 2004).

Algumas relações massa-volume são usadas para descrever as três frações que compõem o solo (sólida, líquida e gasosa) e suas inter-relações. Tomando uma amostra de solo pode-se discriminar as massas e os volumes de cada uma das frações (Figura 1).

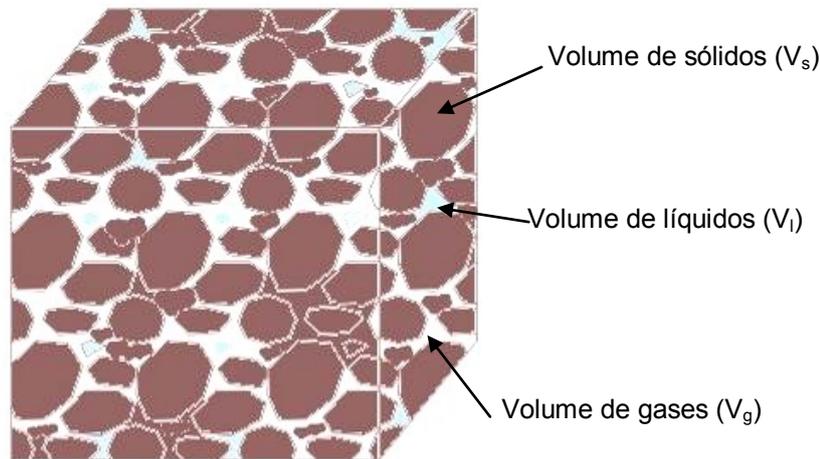


Figura 1 - Amostra de solo indicando as frações de sólido, líquido e gasoso

$$M_t = m_s + m_l + m_g \quad (1)$$

$$V_t = V_s + V_l + V_g \quad (2)$$

Em que,

$M_t$  - Massa total da amostra;

$m_s$  - Massa das partículas sólidas;

$m_l$  - Massa da fração líquida;

$m_g$  - Massa de sua fração gasosa;

$V_t$  - Volume total da amostra;

$V_s$  - Volume dos sólidos da amostra;

$V_l$  - Volume do líquido presente na amostra;

$V_g$  - Volume da fração gasosa da amostra.

### 2.2.1 Densidade das Partículas

A densidade das partículas, representada pela eq. (3) é, às vezes, impropriamente denominada de “densidade real do solo”. A densidade das partículas depende da composição mineralógica do solo e é pouco afetada pela ação do homem. É definida como a razão entre a massa total da amostra seca “ $m_s$ ” e o volume total das partículas sólidas que compõem esta amostra “ $V_s$ ”.

$$d_p = \frac{m_s}{V_s} \quad (3)$$

Em que,

$d_p$  - Densidade de partículas do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ );

$m_s$  - Massa da fase sólida (g);

$V_s$  - Volume ocupado pelas partículas sólidas ( $\text{cm}^3$ ).

Tipicamente, o valor da densidade das partículas varia entre 2,65 a 2,75  $\text{g cm}^3$ , a qual é, em média, a densidade dos componentes mais frequentes no solo; quartzo e silicatos. Contudo, solos que apresentam alto teor de matéria orgânica apresentam menor densidade das partículas.

### 2.2.2 Densidade do Solo

A densidade do solo, apresentada na eq.(4), é muitas vezes também inadequadamente denominada de “densidade global” ou “densidade aparente do solo”. Ao contrário da densidade das partículas a densidade do solo é bastante afetada pelas intervenções provocadas pelo homem. A compactação do solo causada pelo uso intensivo da maquinaria agrícola, reduz o volume total do solo ( $V_t$ ) para uma mesma massa ( $m_s$ ), fazendo a densidade do solo aumentar e, assim, afetando a capacidade de retenção e o movimento de água no solo (ANDRADE et al. 2008). A densidade do solo é definida como sendo a razão entre a massa de solo seco “ $m_s$ ” em uma amostra de solo e o volume total desta amostra “ $V_t$ ”. Na determinação da densidade do solo, tanto o volume das partículas sólidas, quanto o espaço poroso entre elas são considerados. A densidade do solo é um parâmetro físico muito importante e é utilizado no cálculo da sua porosidade. É usado também como um índice para informar o nível de compactação de um solo.

$$d_s = \frac{m_s}{V_t} \quad (4)$$

Em que,

$d_s$  - Densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ );

$V_t$  - Volume total de uma amostra de solo com estrutura indeformada ( $\text{cm}^3$ ).

### 2.2.3 Porosidade do Solo

A porosidade do solo “ $\alpha_s$ ”, eq. (5), indica a fração de poros contidos numa determinada amostra de solo.

$$\alpha_s = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} \times 100 \quad (5)$$

Em que,

$\alpha_s$  - Porosidade do solo (%);

$V_p$  - Volume de poros do solo (cm<sup>3</sup>);

$V_t$  - Volume total do solo (cm<sup>3</sup>);

$V_s$  - Volume da fase sólida (cm<sup>3</sup>).

Pode-se ainda calcular a porosidade do solo em termos de sua densidade, através da relação apresentada na eq. (6).

$$\alpha_s = 1 - \frac{\rho_s}{dp} \quad (6)$$

Portanto, verifica-se que uma mudança na densidade do solo “ $\rho_s$ ” altera a sua porosidade, ou melhor, observa-se que um aumento na densidade do solo produz uma diminuição de sua porosidade e vice-versa.

### 2.2.4 Microporosidade do Solo

A microporosidade do solo é considerada como sendo o conteúdo volumétrico de água retida em sua matriz após a aplicação de uma tensão equivalente a 60 cm de coluna de água (EMBRAPA, 1997), e pode ser calculada de acordo com a eq. (7).

$$\text{Microporosidade} = \frac{m_{60\text{cm}} - m_s}{V_t} \quad (7)$$

Em que,

$m_{60\text{cm}}$  - Massa da amostra após ser submetida a uma tensão de 60 cmca (g);

$m_s$  - Massa da amostra seca (g);

$V_t$  = Volume da amostra (cm<sup>3</sup>).

### 2.2.5 Macroporosidade do Solo

A macroporosidade do solo pode ser determinada pela diferença entre a porosidade total e sua microporosidade, eq. (8).

$$\text{Macroporosidade} = \text{Porosidade total} - \text{Microporosidade} \quad (8)$$

### 2.3 Curva de retenção da água no solo

A água é essencial à produção vegetal, e também age como solvente, que juntamente com os sais, compõe a solução do solo, que por sua vez, fornece nutrientes essenciais aos vegetais em crescimento.

O solo funciona como um reservatório natural de água para as plantas. Visto que esse reservatório é reabastecido descontinuamente pela chuva, é importante o acompanhamento da variação do armazenamento de água no solo, para determinar a necessidade de aplicar água por meio da irrigação ou não.

As características de retenção da água e da condutividade hidráulica do solo avaliam, respectivamente, sua capacidade de armazenamento e a facilidade com que a água é conduzida através dele.

Por meio da análise da porosidade e textura do solo pode-se inferir o comportamento da água em seu interior, revelando suas características de retenção e condução. Para avaliar as características de retenção de água no solo, utiliza-se a curva de retenção de água no solo, que correlaciona o seu teor de água e a tensão com que a mesma está retida no solo.

Muitos fatores interferem na capacidade de retenção de água de um solo. Reichardt, (1990) considera como o principal deles o tipo de solo, pois este define a área de contato entre as partículas sólidas e a água e determina as proporções de poros de diferentes tamanhos. Outros fatores não menos importantes são a estrutura e a granulometria do solo, a estrutura caracteriza o arranjo das partículas e, por consequência, a distribuição dos poros, já a granulometria advém da composição mineralógica do solo.

Consideram-se dois os processos básicos que explicam a retenção de água pelo solo. A capilaridade, que ocorre nos microporos (diâmetro menor que 30 $\mu$ m), sendo mais importante na faixa mais úmida do solo e é mais influenciada por sua

estrutura, e a adsorção, que ocorre nas superfícies dos sólidos como filmes presos a elas, sendo mais importante na faixa mais seca do solo, é influenciada principalmente pela textura e pela sua superfície específica (HILLEL,1971; REICHARDT,1990 e LIBARDI,1995).

Um solo saturado em equilíbrio com a água livre, sob pressão atmosférica, quando submetido a uma força de sucção, terá parte de sua água retirada e o ar penetrará em seu interior. Aumentando-se a sucção, poros cada vez menores perderão água, dando entrada a mais ar. Aplicando-se aumentos gradativos, o fenômeno se repetirá, com diminuição da espessura da película de água que envolve suas partículas. Esta água, estando “presa” mais fortemente, exigirá uma força cada vez maior para ser retirada (KLAR, 1988).

Deste modo, pode-se construir um gráfico relacionando as umidades volumétricas ( $\theta$ ) com os esforços de sucção ou potenciais matriciais da água ( $\Psi_m$ ), que é denominado “curva característica da água no solo” ou “curva de retenção” (JURY et al., 1991).

Por meio da curva de retenção, identifica-se que, quando o solo se encontra na condição de saturação ou próximo desta, pequenas sucções são suficientes para extrair a água do mesmo, por outro lado, em solos com umidades reduzidas a retirada de água exige elevadas sucções. Assim, a curva mostra todas as gradações entre estes extremos, indicando a modificação gradual na tensão com que a água é retida quando se diminui ou aumenta a umidade (BRADY e BUCKMAN, 1989).

Com a curva característica de retenção de água no solo são possíveis inúmeras aplicações, dentre elas a determinação da porosidade drenável, a capacidade de campo e ponto de murcha permanente, a água disponível, a condutividade hidráulica não saturada, além de balanço hídrico, determinando-se a variação do armazenamento de água no solo (CENTURION e ANDRIOLI, 2000).

A relação entre o potencial matricial e a umidade no solo pode ser obtida de duas maneiras diferentes, por secamento e por molhamento do solo. Por secamento, toma-se uma amostra de solo inicialmente saturada de água e aplica-se gradualmente sucções crescentes, fazendo medidas sucessivas da variação da umidade, em função da variação do potencial mátrico ( $\psi_m$ ). Na obtenção por molhamento, toma-se uma amostra inicialmente seca ao ar e permite-se seu molhamento gradual por redução da força de sucção (REICHARDT e TIMM, 2004).

Dependendo da forma de obtenção da curva de retenção, surgem curvas diferentes, ou seja, não equivalentes. Com isso, os valores de uma mesma umidade corresponderão a potenciais matriciais diferentes. Este fenômeno denomina-se histerese (KLAR, 1988). A histerese decorre da diferença do ângulo de contato da água que recua e avança no espaço poroso do solo, e é função do tipo de partículas minerais e orgânicas que favorecem a maior ou menor expansão ou contração dos coloides, bem como da não-uniformidade dos raios dos seus poros capilares (COSTA et al., 2008).

A histerese do solo dificulta a descrição matemática do seu fluxo de água, especialmente quando os fenômenos de molhamento e secamento ocorrem simultaneamente. Para contornar parcialmente o problema, usa-se a curva de molhamento para descrever fenômenos de molhamento, a exemplo da infiltração, e a curva de secamento quando o fenômeno é de secamento, como no caso da evaporação (REICHARDT e TIMM, 2004).

Outro aspecto que exige atenção é a variabilidade tanto metodológica quanto espacial da curva de retenção. Os resultados obtidos por Moraes et al. (1993), em seu estudo contemplando 250 curvas construídas a partir de 8 pontos ( $\psi_m$  versus  $\theta$ ), evidenciaram que os problemas analíticos são de tal ordem que podem levar a interpretações errôneas, comprometendo a qualidade e até a comparabilidade de resultados. A influência da metodologia mostrou-se elevada, principalmente em altas tensões, devendo-se, portanto, optar pela curva de retenção completa e não apenas por um ou dois pontos de interesse.

Apesar das propriedades do solo normalmente apresentarem alta variabilidade espacial, Moraes et al. (1993), ao avaliarem estatisticamente os pontos da curva de retenção, verificaram que as umidades nas várias tensões consideradas em seus experimentos apresentaram, baixo coeficiente de variação (<10%). No mesmo trabalho, os autores identificaram também a necessidade de apenas 3 a 4 amostras para estimar adequadamente a média da umidade para as várias tensões.

As curvas de retenção geralmente são diferentes para solos argilosos, siltosos e arenosos. Pequenas variações de sucção respondem por praticamente toda a variação de umidade nos solos arenosos, enquanto que nos solos argilosos modificações mais expressivas de umidade só são conseguidas pela aplicação de grandes sucções. Isso é explicado pelo fato do solo argiloso possuir uma maior quantidade de poros de dimensões menores quando comparados ao solo arenoso,

ocorrendo a formação de poros de menor diâmetro, intensificando o efeito capilar. Além disso, o mecanismo de adsorção também ocorre de forma mais intensa em solos de textura fina (PEREIRA, 2004).

De posse da curva característica de um solo, pode-se estimar o potencial matricial ( $\psi_m$ ) conhecendo-se a umidade ( $\theta$ ) ou vice-versa. Desde que a geometria do sistema não varie com o tempo, a curva é única e não precisa ser determinada em cada experimento (REICHARDT e TIMM, 2004). A curva característica, bem como outros fatores inerentes aos solos, é variável de amostra para amostra, de local para local, de modo que a determinação de curvas em áreas maiores deverá envolver repetições para que apresentem médias representativas e confiáveis (KLAR, 1988).

As curvas que relacionam o potencial matricial ( $\psi_m$ ) e a umidade ( $\theta$ ) são levantadas experimentalmente, pois não há nenhuma teoria satisfatória para sua previsão, sendo assim, há a necessidade de se definir modelos matemáticos que forneçam um ajuste aos dados experimentais (REICHARDT e TIMM, 2004). Um modelo que vem sendo bastante empregado para se ajustar as curvas de retenção da água no solo é o de van Genuchten (1980), o qual foi utilizado neste trabalho para gerar os ajustes dos parâmetros das curvas de retenção.

### **2.3.1 A Influência da temperatura na curva de retenção de água no solo.**

A temperatura causa grande influência na determinação da curva de retenção de água no solo, isto se deve ao fato de que a intensidade das forças que retêm a água no solo a um dado potencial é dependente da temperatura. A tensão superficial diminui com o aumento da temperatura, o que leva a uma redução no teor de água a um dado potencial. Os efeitos da temperatura sobre as forças de adsorção são um pouco obscuros (KLUTE, 1986), mas, segundo o autor fica evidente que um aumento na temperatura leva a uma redução no teor de água a um dado potencial. Na década de 60, uma série de pesquisadores se dedicou a estudar os efeitos da temperatura sobre a tensão superficial, mostrando que apenas esses efeitos não são suficientes para explicar as diferenças observadas (PECK, 1960; WILKINSON e KLUTE, 1962; CHAHAL, 1963; 1965 e 1966), mas que também as alterações devido à temperatura, no volume de ar aprisionado na amostra, têm que ser levadas em

consideração (CHAHAL 1963), além da dependência do próprio volume de água com a temperatura (PECK, 1960).

### **2.3.2 A Influência da estrutura e textura do solo na curva de retenção de água**

Os fatores que influenciam a disponibilidade de água às culturas são: a estrutura do solo, por determinar o arranjo das partículas; a textura, que determina a composição granulométrica do solo e o teor de matéria orgânica (KLEIN e LIBARDI, 2000). A textura do solo, principalmente o teor de argila, define em boa parte a distribuição do diâmetro dos poros do solo, determinando assim a área de contato entre as partículas sólidas e a água, sendo por isso responsável pela força de retenção, principalmente em baixos potenciais, a exemplo do ponto de murcha permanente (PMP) (REICHARDT, 1987).

A textura e a estrutura do solo são importantes fatores na determinação das características dos poros, onde a água e o ar são retidos. Alguns solos argilosos podem apresentar elevado índice de agregados, fazendo-os se comportarem como solos arenosos, quanto à retenção de água (ADÁMOLI et al., 1985).

O teor de argila mais silte afeta de forma significativa o teor de água no ponto de murchamento permanente, enquanto a estrutura do solo tem menor influência na retenção da água nesse ponto (ARRUDA et al., 1987) e (BELL e VAN KEULEN, 1995).

A textura do solo tem uma importância relevante do ponto de vista físico em muitas propriedades do solo, como fator determinante na propriedade de retenção e capacidade de armazenamento de água e nutrientes, a distribuição dos poros e, conseqüentemente, das propriedades de condução de água e gases e suas trocas com a atmosfera e as plantas. Na estrutura do solo, nas propriedades de resistência à penetração de raízes e à implementos de movimentação mecânica do solo, e nas chamadas propriedade térmicas do solo, tais como capacidade calorífica e condutividade térmica.

### 2.3.3 Análise Granulométrica do Solo

O termo “análise mecânica de solos” foi introduzido na literatura no primeiro ano do século XIX (KRUMBEIN, 1932). Este termo é hoje conhecido como análise granulométrica de solos e pode ser definido como a distribuição do tamanho das partículas primárias de sua fase sólida, baseada nos diâmetros equivalentes destas partículas. Aquelas menores que 2,00 mm são geralmente divididas em três frações: areia, silte e argila. Vários sistemas de classificação têm definido diferentes limites para estas frações (GEE e BAUDER, 1986).

Na escala sugerida pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos- USDA (adotada no Brasil), a fração areia tem diâmetro compreendido entre 2,00 e 0,05 mm, o silte de 0,05 - 0,002 mm e a argila < 0,002 mm (BAVER et al. 1972) e (TAN, 1996). É uma das mais comuns de todas as determinações em física de solo, frequentemente utilizada na classificação textural de solos, curva de distribuição do tamanho das partículas (GEE e Or, 2002), cujos dados servem de base para estimar propriedades hidráulicas do solo (HWANG e POWERS, 2003) e (CHAKRABORTY et al., 2006).

A análise granulométrica do solo é muito utilizada para estimar algumas propriedades hidráulicas, entre elas a curva de retenção de água no solo (ARYA e PARIS, 1981) e (HWANG e POWERS, 2003). As funções de pedotransferência entre os tamanhos de partículas e a umidade obtida a partir da curva de retenção de água no solo, evidenciam a estreita relação entre essas propriedades (ARYA e PARIS, 1981), (KELLER e GEE, 2006) e (GHANBARIAN e LIAGHAT, 2007). O conhecimento da função da fração argila no solo não é recente, especialmente em relação a sua atividade na adsorção e fornecimento de água às plantas (ALBRECHT e McCALLA, 1938). Salter et al., (1966) estudando a influência da textura na umidade do solo, concluíram que a capacidade de água disponível do solo é inversamente proporcional ao percentual de areia grossa e diretamente proporcional ao percentual de partículas finas.

Uma grande variedade de técnicas em análise granulométrica de solos está disponível na literatura (McTAINSH et al., 1997). Cerca de 400 métodos são atualmente conhecidos (BARTH e SUN, 1985) e (LOVELAND e WHALLEY, 2000). Muitas destas técnicas estão resumidas em McCave e Syvitski (1991) e discutidas por outros autores em (SYVITSKI, 1991).

Uma excelente revisão dos primeiros trabalhos sobre análise granulométrica de solos, incluindo sua história, princípios e métodos, está detalhada em Krumbein (1932), e, mais recentemente, em (MILLER et al. 1988). De modo geral, os diferentes métodos incluem: peneiramento; peneiramento combinado com sedimentação e métodos de sedimentação (RYŽAK et al., 2007), cujos procedimentos podem ser resumidos em três etapas: o pré-tratamento das amostras, para remoção de agentes cimentantes e flocculantes; dispersão das amostras e quantificação das frações do solo (GEE e BAUDER, 1986), (MINASNY et al., 2007) e (CHAUDHARI et al., 2008).

Na análise por peneiramento, as partículas de solo, após dispersão, são passadas em peneiras com malha quadrada de dimensões específicas, por exemplo, 53  $\mu\text{m}$  no caso da separação da areia das outras frações (BLOTT e PYE, 2006). Por outro lado, no método de sedimentação o tamanho das partículas é determinado com base na medida do seu tempo de queda num líquido. Dois destes métodos mais comumente usados são o da pipeta e o do densímetro (LIU et al., 1966), (GEE e BAUDER, 1986) e (ELLIOTT et al., 1999).

Esses métodos consideram, via de regra, a sedimentação de partículas teoricamente esféricas e em regime de fluxo laminar, conforme sugere a Lei de Stokes (STOKES, 1851) usada para calcular a velocidade com que as partículas em suspensão sedimentam.

A partir desta velocidade, é calculado o tempo necessário para que uma partícula do solo de determinado diâmetro seja sedimentada. O material que permanece nessa suspensão aquosa pode ser quantificado de duas maneiras: por coleta de alíquotas (método da pipeta, micro-pipeta) ou a partir de sua densidade (método do hidrômetro) e, expresso em massa.

De acordo com Starr et al. (2000), um dos métodos mais tradicionais a usar a Lei de Stokes foi o de (CASAGRANDE 1934). Entretanto, uma abordagem mais precisa usando essa teoria é o método da pipeta, desenvolvido entre 1922 e 1923, publicado independentemente por Robinson, (1922) e Jennings et al., (1922).

Em 1926, este método tornou-se padrão para análises de rotina, devido à recomendação do subcomitê da "Agricultural Education Association" da Grã-Bretanha, após comparar diversos métodos para análise granulométrica de solos (COMBER et al., 1926). Atualmente, apesar da evolução tecnológica, que tem proporcionado o surgimento de novos equipamentos e métodos, o método da pipeta

ainda é mantido como referência na avaliação da precisão e exatidão de outros métodos (RYŽAK et al., 2007).

### 2.3.4 Método da Pipeta

O método da pipeta consiste em pipetar uma subamostra de um solo em suspensão aquosa, mantida numa proveta de 1 litro, após o tempo  $t$  de sedimentação, a uma profundidade  $h$  da suspensão, abaixo da qual todas as partículas com diâmetro “ $d$ ” maior que “ $X$ ” encontram-se sedimentadas. Segundo a Lei de Stokes, o tempo  $t$  (s), que determina o momento da coleta da fração argila, a uma determinada temperatura é representado pela eq. (9).

$$t = \frac{18 \times \eta_s \times h}{g(\rho_p - \rho_1)X^2} \quad (9)$$

Em que,

$\eta_s$  - Viscosidade da solução em função da temperatura ( $\text{g cm s}^{-1}$ );

$h$  - Profundidade de coleta (cm);

$\rho_p$  - Densidade da partícula ( $\text{g cm}^{-3}$ );

$\rho_1$  - Densidade da solução ( $\text{g cm}^{-3}$ );

$g$  - Aceleração da gravidade ( $\text{cm s}^{-2}$ );

$X$  - Diâmetro da partícula (cm).

A viscosidade ( $\eta_s$ ) e densidade da solução ( $\rho_1$ ) em função da temperatura são calculadas pelas eq. (10) e (11), respectivamente.

$$\eta_s = \eta_{\text{água}} (1 + 4,25.C_s) \quad (10)$$

$$\rho_l = \rho_{\text{água}} (1 + 0,63.C_s) \quad (11)$$

Em que,

$\eta_{\text{água}}$  - Viscosidade da água;

$\rho_{\text{água}}$  - Densidade da água;

$C_s$  - Concentração do dispersante químico ( $14 \text{ g L}^{-1}$ ).

Este método tem como desvantagem requerer um tempo muito grande para a execução da análise (TAN, 1996), (MURRELL, 2006) e (GOOSSENS, 2008).

### 2.3.5 Método do hidrômetro

O método do hidrômetro, também chamado de método de Bouyoucos, baseia-se no princípio da taxa de sedimentação ser proporcional ao tamanho da partícula de solo. Assim, as partículas de areia se sedimentam mais rapidamente que as de silte, que por sua vez se sedimentam mais rapidamente que as de argila (ELLIOTT et al., 1999). Um dos pioneiros a usar o hidrômetro para estimar a quantidade de sólidos em uma suspensão de solução de solo foi Bouyoucos (1927, 1951, 1962). Neste método, as porcentagens de areia, silte e argila são obtidas a partir de leituras no hidrômetro em 40 s, 4 min e 2h, respectivamente. Esse método, sugerido por Bouyoucos (1962) ainda é muito utilizado atualmente em análises de rotina por várias universidades e institutos de pesquisas, utilizando-se apenas duas leituras no hidrômetro (40 s e 2 h). Segundo Walter et al. (1978), tanto o método do densímetro como o da pipeta, se forem seguidos os procedimentos de pré-tratamento das amostras, fornecem resultados comparáveis.

O hidrômetro recomendado pela “American Society for Testing and Materials” (ASTM), tido como padrão, é o modelo nº 152H, com escala de Bouyoucos em  $g L^{-1}$  (Figura 2). Este instrumento fornece, em determinado tempo, uma leitura que tem relação direta com uma dada profundidade linear efetiva de leitura, a qual varia em função da densidade das partículas sólidas em suspensão. Portanto, a partir da Lei de Stokes, é possível calcular o diâmetro médio das partículas em uma suspensão de solução de solo.

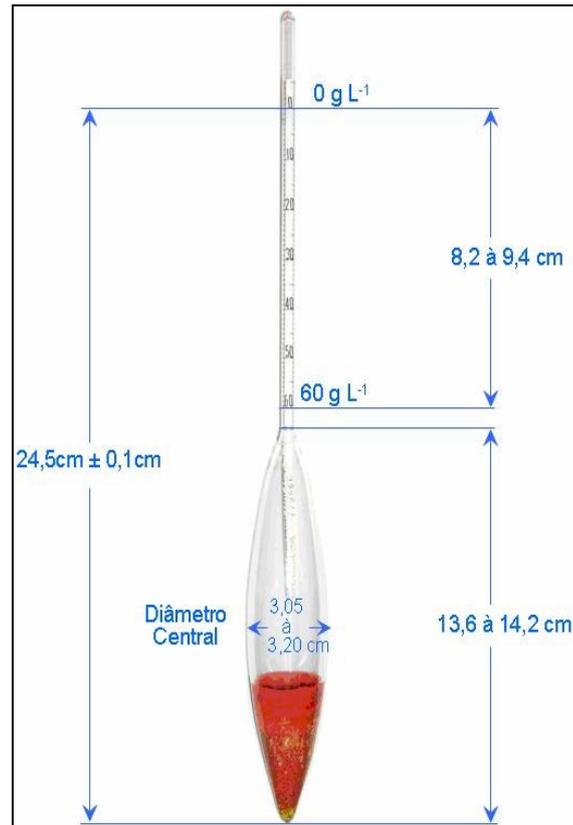


Figura 2 - Diagrama esquemático do hidrômetro da ASTM, modelo 152 H  
 Fonte: retirado de Almeida (2008).

## 2.4 Métodos para a determinação da Curva de Retenção

### 2.4.1 Método da câmara de pressão de Richards

Vários métodos utilizados para a elaboração da curva de retenção de água no solo são encontrados na literatura, dentre eles o método considerado clássico e mais utilizado é o método da câmara de pressão de Richards (RICHARDS e FIREMAN, 1943). É um método de laboratório, também chamado de “extrator de membrana”, “extrator de placa porosa” ou “extrator de Richards”, que se presta à determinação da curva de retenção na faixa de -100 a -20.000 hPa (ANDRADE et al., 2008).

Apesar de ser considerado o método padrão para a determinação da curva de retenção, este método possui algumas desvantagens como promover a paralisação da drenagem devido à interrupção do contato entre a amostra e a placa porosa, a demora na obtenção dos pontos necessários para o levantamento da curva e o alto custo na aquisição dos resultados.

### 2.4.2 Método da Centrifuga

A técnica da centrifugação de amostras de solo (Figura 3) para determinar a relação entre o conteúdo de umidade e a tensão com que ela está retida no solo é bastante antiga (BRIGGS E MCLANE, 1910). É objeto de vários estudos (ODÉN, 1976), (FREITAS JÚNIOR e SILVA, 1984) e (MEDEIROS, 1987). Estes autores mostraram as limitações e potencialidades do método.

Cabe destacar ainda, que Malcom e André (1991) reconheceram a importância desse método, ao incluí-lo entre os procedimentos de determinação da curva de retenção de água no solo. Para cada rotação escolhida na determinação da curva, correlaciona-se um potencial matricial. O método tem como vantagem promover a rapidez na obtenção do equilíbrio da umidade no solo, normalmente menos de seis horas (FREITAS JÚNIOR e SILVA, 1984), além de envolver uma única saturação do solo minimizando os efeitos da histerese (SILVA, 1980). Porém, apresenta como desvantagens a presença de grumos, que dificultam e podem limitar o fatiamento da amostra e causar a compactação das amostras de solo, durante o processo de centrifugação (FREITAS JÚNIOR e SILVA, 1984).

Outro fator relevante observado por Silva e Azevedo (2002), é que a temperatura interna do equipamento onde estão alojadas as amostras de solo deve-se apresentar entre 16 a 21 C° no momento do ensaio.

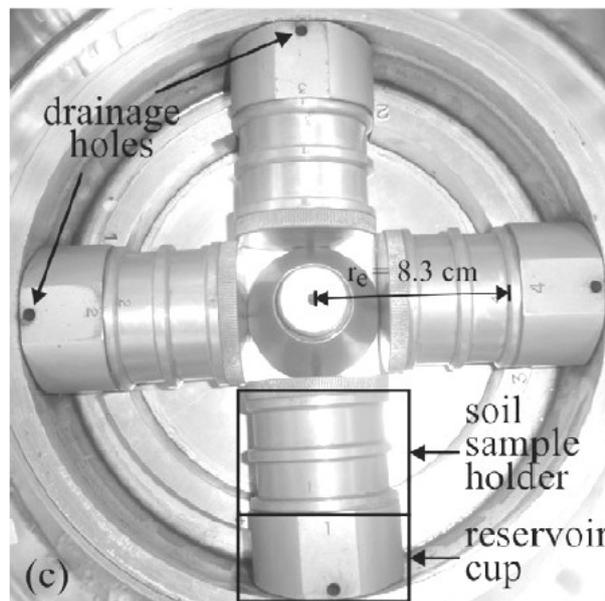


Figura 3 - Disposição das amostras no interior da centrífuga  
 Fonte: adaptado de Reatto et al. (2008).

A tensão média,  $\bar{h}$  (kPa), estabelecida na amostra de solo, no intervalo de  $r_i$  (raio interno) a  $r_e$  (raio externo), é determinada pela eq. (12) (FREITAS JÚNIOR e SILVA, 1984):

$$\bar{h} = \frac{k}{6} \times \frac{W^2 L}{g} (L - 3r_e) \quad (12)$$

Em que,

$\bar{h}$  = Tensão média (kPa);

$k = 0,09807$  (kPa cm<sup>-1</sup>);

$\omega$  = Velocidade angular (rad s<sup>-1</sup>);

$g$  = Aceleração da gravidade (981 cm s<sup>-2</sup>);

$L$  = Comprimento da amostra ao longo do eixo da centrífuga (cm).

### 2.4.3 Método WP4 (Dewpoint Potentia Meter)

É um método relativamente novo e tem sido utilizado por alguns pesquisadores principalmente para obtenção dos pontos de maior tensão. O Dewpoint Potentia Meter (WP4) é um equipamento fabricado pela empresa Decagon Devices Inc, a versão mais atual deste instrumento é o (WP4-T). O referido equipamento vem equipado com um sensor de temperatura, que otimiza seu funcionamento em termos de regulação de sua temperatura interna (Figura 4). Mede o potencial da água retida no solo quando ocorre o equilíbrio entre a pressão de vapor de saturação na amostra ( $P_o$ ) e pressão de vapor do ar na câmara de leitura ( $P$ ). Com os valores de  $P_o$  e  $P$ , o sistema calcula o potencial ( $\Psi$ ) por meio da equação de Kelvin, na qual:  $R$  é a constante universal dos gases (8,31 J/mol K);  $T$  é a temperatura (Kelvin) da amostra e  $M$  a massa molecular da água. A leitura do potencial de água por amostra de solo é obtida rapidamente ( $\leq 5$  min) e permite a determinação da curva de retenção da água no solo em poucas horas (SCANLON et al., 2002).



Figura 4 - Water Potential Meter (a), com vista da parte interna e detalhes da câmara de leitura (b), equação para estimar a energia da água retida no solo (c)  
 Fonte: Adaptado de Almeida (2008)

Este método, como os demais mencionados possui limitações, vantagens e desvantagens. Trabalhos recentes mostram que o método apresenta falhas como a generalização do volume de água necessário para criar uma umidade no solo, independentemente da sua textura, o que dificulta a obtenção de resultados satisfatórios (ALMEIDA, 2008). Também foi observado que este método permite trabalhar apenas com solo deformado e que é muito susceptível a mudanças na temperatura ambiente, podendo acarretar possíveis erros. O equipamento também possui pouca precisão na faixa de trabalho onde são caracterizados pontos importantes da curva de retenção de água no solo, quando se trata de informação para manejo da irrigação. Trabalhos realizados recentemente mostraram que o equipamento possui pouca precisão quando utilizados para determinar tensões menores que -1.000 hPa, não sendo recomendado o uso nessas condições (KLEIN, 2010).

#### 2.4.4 Método do funil de Haines e mesa de tensão

São métodos de laboratório utilizados para a determinação de pontos iniciais da curva de retenção, isto é, pontos de baixas tensões, potencial matricial menores que -100 hPa, (LIBARDI, 2000). Esses equipamentos permitem a determinação em condições de laboratório do potencial matricial do solo em amostras deformadas ou indeformadas.

Um dos equipamentos de sucção mais utilizados é o funil de Büchner, introduzido por Bouyoucos (1929) e adaptado por Haines (1930).

O equipamento tem como meio poroso uma placa de cerâmica, que, de acordo com a literatura, possui várias formas de instalação (HAINES, 1930), (DANIELSON e SUTHERLAND, 1986) e (TOWNEND et al., 2000). O funil de Büchner ou funil de Haines, (Figura 5A) como é atualmente conhecido, tem como principal limitação o uso de apenas uma amostra de solo por vez, necessitando de vários funis para agilizar a determinação da curva de retenção. Tentando amenizar essa limitação, Leamer e Shaw (1941) e Oliveira (1968) propuseram o uso de uma mesa de tensão (Figura 5B), a qual opera utilizando o mesmo princípio do funil de Haines, exceto que, no lugar da placa, tem-se um meio poroso conhecido como papel mata-borrão. A mesa de tensão possui a vantagem de se trabalhar a várias tensões e com várias amostras simultaneamente. Contudo, esse método tem como inconveniente a necessidade da troca constante das folhas de mata-borrão, bem como o fato do papel não suportar a aplicação de tensões relativamente elevadas, próximas à capacidade de campo do solo.

Os pontos de tensões que são determinados pela mesa de tensão ou funil de Haines são considerados muito importantes para estudos de perda de água, fertilizantes e agroquímicos no solo (ANDRADE et al., 2008).

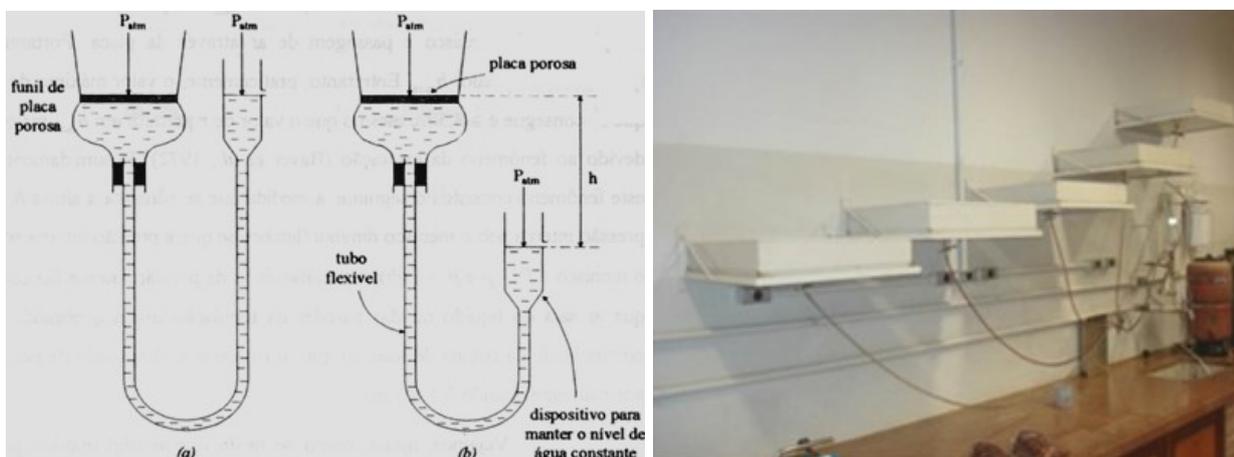


Figura 5 - (A) Representação esquemática do Funil de Haines; (B) mesa de tensão

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.2 Localização e caracterização experimental

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia de Biosistemas no campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” unidade que pertence à Universidade de São Paulo, no município de Piracicaba-SP.

Os solos estudados foram classificados como Nitossolo Vermelho Eutroférico (textura argilosa) e Latossolo vermelho-amarelo (textura arenosa) de acordo com os critérios do Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (Embrapa, 2006).

O solo argiloso foi coletado na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas localizado na Fazenda Areão, município de Piracicaba-SP, mais precisamente no ponto que compreende as coordenadas geográficas 22°41'58,91" de latitude sul e 47°38'44,15" de longitude oeste, a uma altitude de 518m (Figura 6).



Figura 6 - Vista da Fazenda Areão e do ponto de coleta do solo argiloso  
Fonte: Imagem extraída de Google Earth (2012)

O solo arenoso foi coletado na área que pertence ao Departamento de Produção Vegetal, dentro da ESALQ, onde se encontra instalada atualmente a cultura de citros, cujo ponto amostral compreende as coordenadas geográficas 22°

43'02,26" de latitude sul e 47° 37'06,41" de longitude oeste e a uma altitude de 573m (Figura 7). A coleta para ambos os solos foram realizadas de maneira deformada em quantidade suficiente para a realização das análises de curva de retenção e granulometria do solo.



Figura 7- Vista do ponto de coleta do solo arenoso  
Fonte: Imagem extraída de Google Earth (2012)

A coleta em ambos os solos iniciou-se com a remoção da camada superficial, aproximadamente 0,05m de profundidade, com a finalidade de remover as ervas daninhas e limpar a área a ser amostrada. Posteriormente, com auxílio de pá manual cavou-se até a profundidade de 0,30m onde procedeu a coleta do solo utilizado tanto para o preenchimento dos anéis quanto para a análise granulométrica.

### 3.3 Preparo do solo

Após a coleta as amostras foram transferidas para o laboratório e colocados em bandejas de metal deixando-as secar ao ar. Posteriormente com auxílio de martelo de borracha foram destorroadas (TSA) e depois peneiradas utilizando peneira de malha 2,00mm (ABNT 10) (Figura 8), obtendo terra fina seca ao ar (TFSA). Logo após, foram acomodadas em bandejas metálicas e colocadas para

secar em estufa elétrica a 105-110°C por 24 horas, obtendo terra fina seca em estufa (TFSE).



Figura 8 - Peneira malha abertura 2,00 mm

### 3.4 Análise granulométrica

A caracterização da análise granulométrica do solo utilizado no experimento, foi resultado da média de 3 repetições para cada tipo de solo (Tabela 1).

As análises granulométricas do solo foram realizadas no Laboratório de Física do solo, do Departamento de Engenharia de Biosistemas. Para a realização da referida análise foi adotada a metodologia de Bouyoucos (densímetro), conforme as recomendações de Embrapa, (1997).

Inicialmente utilizou-se uma balança analítica de precisão centesimal onde foram colocados 50 gramas para o solo argiloso e 100 gramas para o solo arenoso de (TFSE) em recipientes de vidro (Figura 9).

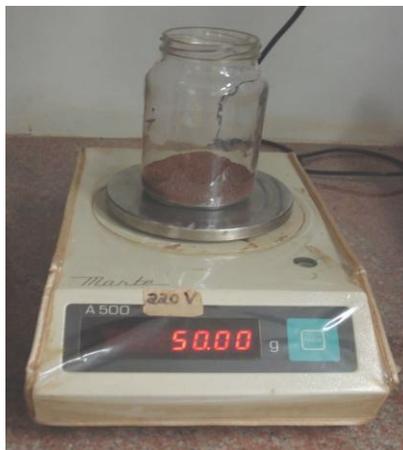


Figura 9 - Balança analítica utilizada para pesagem do solo

Posteriormente foi adicionado ao recipiente de vidro 250 ml de água, obtida do processo de osmose reversa ( $0,08\mu\text{Mol/cm}$ ) de tal forma que o solo ficasse totalmente coberto pela água. Com auxílio de uma pipeta volumétrica adicionou-se 10 ml de hidróxido de sódio (NaOH) em ambos os solos, na concentração 1N, ou seja,  $40\text{ g L}^{-1}$  cuja função consiste em auxiliar na dispersão das partículas do solo.

Após estes procedimentos, as amostras foram colocadas na mesa agitadora horizontal permanecendo por 16 horas a uma rotação de 30 rpm (CAMARGO, 2009), com o intuito de promover a completa homogeneização e desagregação das partículas do solo.(Figura 10).



Figura 10 - Detalhe da mesa agitadora horizontal

Posteriormente, as amostras foram transferidas para provetas de vidro com capacidade de 1L e completadas os volumes com água de osmose reversa até o limite. Com o auxílio de um agitador manual, agitou-se o conteúdo da amostra por 1 minuto ininterrupto, a fim de garantir uma homogeneização da solução do solo (Figura 11A). Decorridos 30 segundos do início da sedimentação foi introduzido cuidadosamente o hidrômetro na suspensão em repouso, causando a mínima perturbação possível na suspensão. Há exatos 40 segundos foi realizada a primeira leitura no hidrômetro, esta leitura informa o conteúdo da fração silte e argila em suspensão (Figura 11B).



Figura 11 - (A) Agitação da solução do solo; (B) Introdução do hidrômetro na solução do solo

A segunda leitura foi efetuada 120 minutos depois de decorrido a primeira, esta leitura informa o conteúdo da fração argila em suspensão. A fração areia foi calculada pela diferença entre a primeira e segunda leitura.

Tanto na primeira leitura quanto na segunda foram observados os valores de temperatura da solução do solo, os quais foram posteriormente utilizados para o ajuste das leituras de densidades obtidas no hidrômetro, de acordo com (KIEHL, 1979).

Os cálculos para determinação da análise granulométrica foram realizados com base nas eq.(13) (14) (15).

$$\% \text{Argila} = 2^{\circ} \text{ leitura corrigida} / (\text{g}) \text{ TFSE} * 100 \quad (13)$$

$$\% \text{Silte} = (1^{\circ} \text{ leitura corrigida} - 2^{\circ} \text{ leitura corrigida}) / (\text{g}) \text{ TFSE} * 100 \quad (14)$$

$$\% \text{Areia} = 100 - (1^{\circ} \text{ leitura corrigida} / (\text{g}) \text{ TFSE} * 100) \quad (15)$$

Os valores de argila, silte e areia, para ambos os solos são apresentados na Tabela 1 e classificados segundo triangulo de classificação textural (Figura 12) como argila e areia franca.

Tabela 1 - Valores médios de três repetições dos teores de argila, silte e areia dos solos, utilizados na elaboração das curvas características de retenção de água do solo

	%Argila	%Silte	%Areia	Classificação textural
Argiloso	56,55	20,12	23,33	Argila
Arenoso	11,42	8,24	80,34	Areia franca

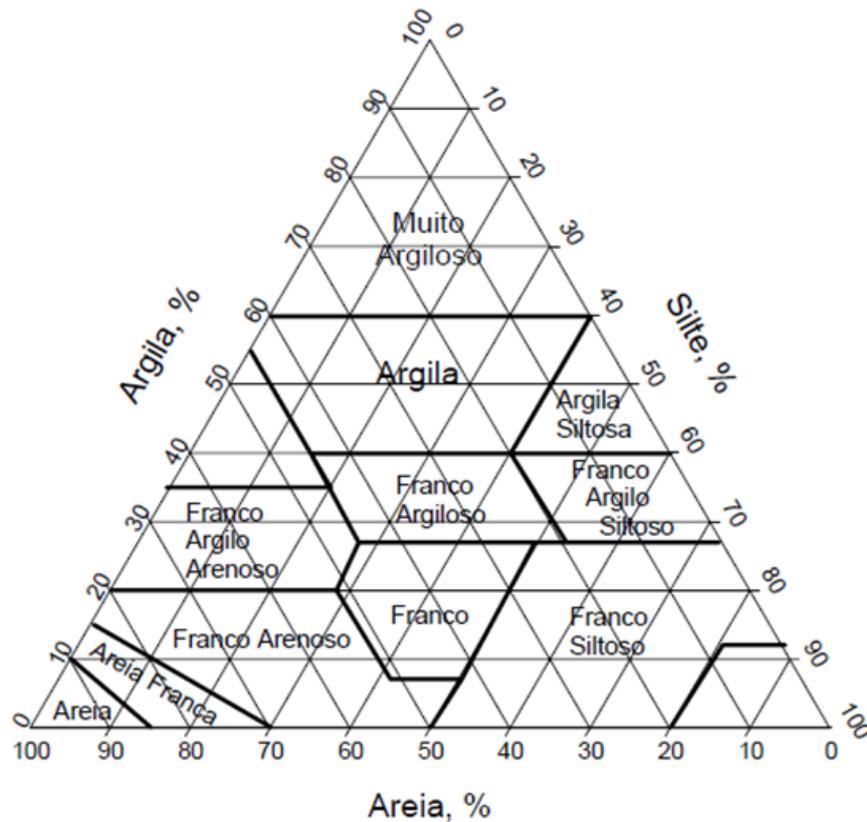


Figura 12 - Triângulo de classificação textural de solos  
Fonte: Santos et al. (2005).

### 3.5 Curva de Retenção de Água no Solo

#### 3.5.1 Características e preparação dos anéis

Foram utilizados para a pesquisa, 18 anéis de aço inoxidável contendo dimensões de 3,0 cm de altura e 4,7 cm de diâmetro (Figura 13A), dimensões estas que estão dentro dos padrões geralmente utilizados (KLUTE, 1986). Desses, foram utilizados 9 (nove) para realização das repetições do solo arenoso e 9 (nove) para repetições do solo argiloso.

Em uma das extremidades do anel foi colocado um material 100% viscoso (tipo Perflex), fixado externamente com borracha de látex (Figura 13B). Esse material possui dupla função. A primeira é a de manter a mesma quantidade de solo durante o processo da curva de retenção, que dependendo da textura do solo utilizado e da escolha dos pontos de tensões pode chegar a 90 dias. A segunda, promover um contato adequado do solo com a placa porosa, o que é extremamente importante do ponto de vista físico na elaboração da curva de retenção.

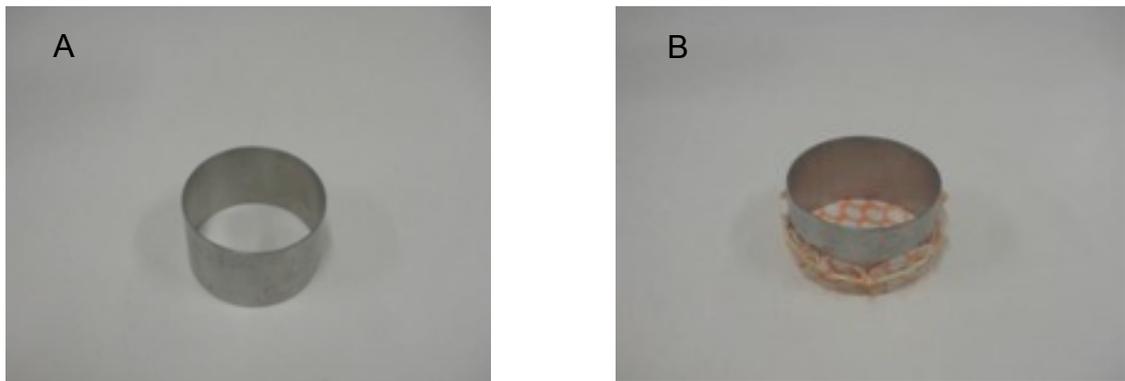


Figura 13 - (A) Anel de Koppek; (B) Acomodação do Perflex

### 3.5.2 Acomodação do Solo nos anéis

No processo de acomodação do solo no interior dos anéis utilizou-se TFSA com o devido cuidado de manter a mesma compactação para todas as repetições, sendo assim, a acomodação do solo no interior dos anéis foi realizada em três camadas levemente compactadas, de modo que as repetições apresentassem rigorosamente a mesma densidade do solo, tanto para o solo arenoso quanto para o argiloso,  $1,26 \text{ g cm}^{-3}$  e  $1,12 \text{ g cm}^{-3}$  respectivamente. Utilizando este procedimento, foi possível trabalhar as amostras eliminando ao menos uma das variáveis presentes no solo. (Figura 14).



Figura 14 - Etapas do preparo das amostras

### 3.5.3 Saturação das amostras

No processo que envolve a saturação das amostras, as mesmas foram colocadas em uma bandeja plástica, onde foram saturadas por meio da elevação gradual, este procedimento consiste em adicionar uma lâmina de água destilada e desaerada na bandeja até atingir cerca de 2/3 da altura da amostra, permanecendo por um período de aproximadamente 24 horas (MORAES, 1991), garantindo dessa forma a elevação do nível da lâmina de água a fim de que as bolhas de ar pudessem ser liberadas (KLUTE, 1986) e (BALL; HUNTER, 1988) (Figura 15).

Logo após o período de saturação, as amostras foram retiradas da água deixando-as drenar livremente, em seguida foram pesadas a fim de avaliar o conteúdo volumétrico na condição de saturação.



Figura 15 - Processos de saturação das amostras de solo

### 3.5.4 Determinação dos pontos de umidades da curva de retenção

As curvas de retenção de água no solo, para ambos os solos, foram realizadas pelo processo via secamento das amostras, minimizando assim o processo de histerese.

Para determinação da curva de retenção, inicialmente as amostras foram submetidas ao sistema de extração de água através da mesa de tensão (Figura 16A), a qual consiste em bandejas de vidro com dimensões de 0,42 x 0,42 m, posicionadas a várias alturas em relação ao recipiente de drenagem da água (kitassato). A preparação da mesa de tensão consiste em formar uma lâmina de água em torno de 1,0 cm sobre o vidro, garantindo assim a inexistência de ar no sistema. Após estes procedimentos coloca-se uma tela (tipo filó) medindo aproximadamente 0,25 x 0,25 m sobre o vidro, cuja função consiste em auxiliar na drenagem da água até o ponto central da mesa, onde se encontra um orifício de drenagem. Por último, sobre a tela acomoda-se o papel filtro quantitativo 250 g contendo dimensões de 0,50 x 0,50 m. O procedimento para a medida de  $\Psi_m$  por meio da utilização da mesa de tensão, envolve a colocação das amostras saturadas em contato hidráulico com o papel mata-borrão, tomando-se o cuidado de garantir um bom contato da amostra com o mesmo (Figura 16B).

Após realizar o contato hidráulico da amostra de solo com o papel filtro, abaixa-se a mangueira flexível até um valor de  $h$  desejado, que no caso deste trabalho foi de 10 hPa. Com o desnível, ocorre a drenagem da água presente na amostra de solo (gotejamento através do tubo flexível) até que a condição de equilíbrio seja alcançada, momento em que o gotejamento se encerra. Na condição de equilíbrio, o potencial total ( $\Psi_t$ ) é igual à soma dos potenciais de pressão, mátrico e gravitacional ( $\Psi_t = P + \Psi_m + Pgz$ ).

Após atingirem a condição de equilíbrio, as amostras foram retiradas e pesadas utilizando uma balança analítica de precisão centesimal, obtendo assim o peso da amostra naquela tensão. Posteriormente as amostras foram colocadas novamente na mesa de tensão, desta vez em um desnível maior 20 hPa, novamente após atingirem o equilíbrio as amostras foram retiradas e pesadas. Repete-se os procedimentos anteriores para o desnível igual a 40 hPa.

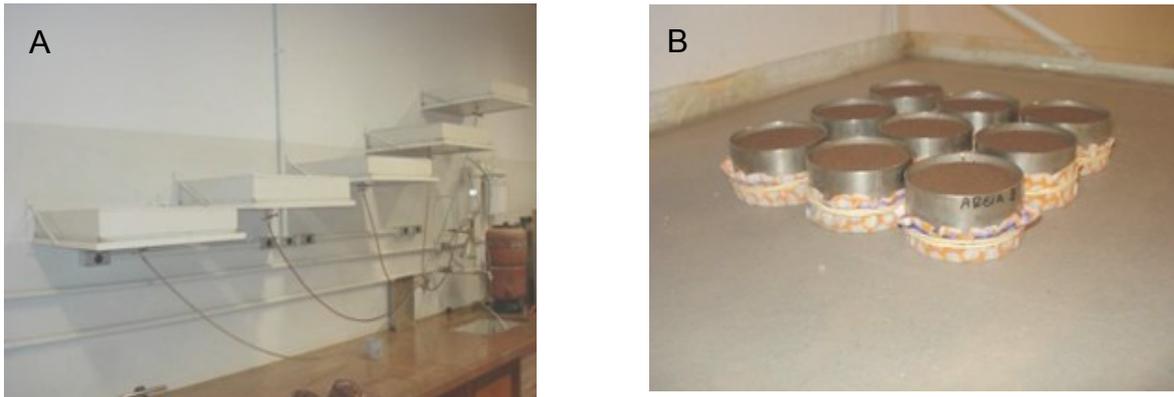


Figura 16 - (A) Conjunto de mesas de tensão e detalhe mesa de tensão. (B) Acomodação das amostras sobre o papel filtro

Para tensões superiores a 40 hPa, utilizou-se a câmara de pressão de Richards com placa porosa (RICHARDS e FIREMAN, 1943), equipamento fabricado pela Soilmoisture Equipment Corporation.

Nas câmaras de Richards foram realizadas as tensões de 100; 200; 300; 500; 700; 1.000; 5.000; 10.000 e 15.000 hPa. Onde para todas as tensões a temperatura ambiente foi controlada em torno de 20° C.

A câmara de pressão de Richards (Figura 17) é o método tradicional de determinação da curva de retenção da água no solo, sob condições de laboratório (PREVEDELLO, 1996). O equipamento é constituído de uma câmara capaz de suportar alta pressão. No interior da câmara fica alojada uma placa porosa a qual está ligada à atmosfera por intermédio de um dreno (LIBARDI, 2000). O arranjo instrumental é tal que a parte inferior da placa encontra-se continuamente sob pressão atmosférica e a parte superior, onde se encontra a amostra de solo, sob pressão controlada de ar (REICHARDT e TIMM, 2004).

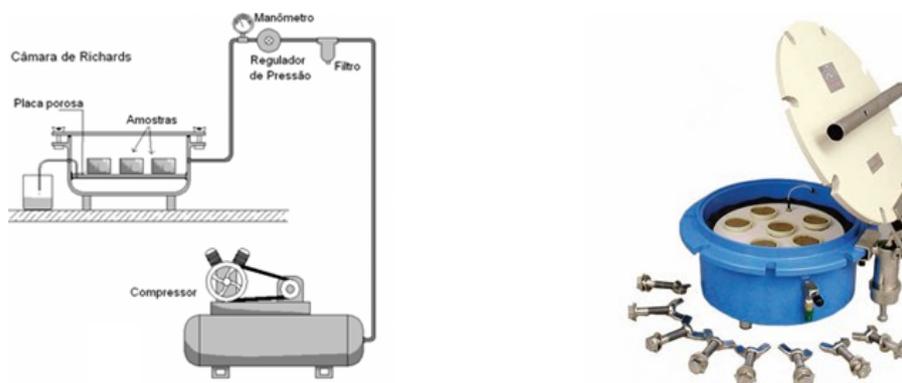


Figura 17 - Sistema de controle de pressão e câmara de Richards

Na utilização das câmaras de pressão, os anéis contendo solo foram acondicionados sobre as placas de cerâmica, previamente saturada, garantindo com isso a passagem apenas da solução do solo através da placa cerâmica para o meio externo. Essas placas são fabricadas pela Soil Moisture Equipment Corp. Santa Barbara CA, e são diferenciadas pela sua porosidade, tamanho e inclinação da cerâmica. Portanto, para cada faixa de pressão que se quer determinar utiliza-se uma determinada placa. Como mencionado anteriormente, as placas são confeccionadas contendo diferentes porosidades, portanto, devem ser utilizadas dentro do limite de cada faixa de pressão, para que não ultrapassem a pressão de borbulhamento da mesma, pressão acima da qual ocorre a passagem de ar através dos poros da placa (PREVEDELLO, 1996).

A placa de 1.000 hPa (Figura 18A) cuja numeração do fabricante é 0675B01M1, mede exatamente 27,3 cm de diâmetro por 0,701cm de espessura, a base da cerâmica é plana e foi utilizada neste trabalho para determinar as pressões de 100; 200; 300; 500; 700 e 1.000 hPa. Esta placa cerâmica possui poros com características de suportar pressões de trabalho de no máximo 1.000 hPa. Para a determinação da pressão de 5.000 hPa utilizou-se placa de 5.000 hPa, (Figura 18B) a qual possui a seguinte numeração do fabricante: 0675B05M1. Esta placa possui dimensões de 27,3 cm de diâmetro por 0,701 cm de espessura. Possui como características a base da cerâmica plana e poros que suportam pressão de trabalho de no máximo 5.000 hPa. Finalmente, para as pressões de 10.000 e 15.000 hPa utilizou-se placa de 15.000 hPa, (Figura 18C) cuja numeração do fabricante é: 0675B15M1. Esta placa tem como características base da cerâmica côncava e dimensões exatas de 25,88 cm de diâmetro por 0,594 cm de espessura, segundo o fabricante. Possui poros na cerâmica que suportam pressão de trabalho de no máximo 15.000 hPa.



Figura 18 - (A) Placa de 1.000 hPa; (B) Placa de 5.000 hPa e (C) Placa de 15.000 hPa respectivamente

As pressões utilizadas entre 100 e 1.000 hPa para a elaboração dos pontos da curva de retenção foram controladas através de colunas de mercúrio com precisão milimétrica (Figura 19A). Para os pontos de alta pressão, ou seja, 5.000; 10.000 e 15.000 hPa o controle da pressão foi realizado através de manômetros analógicos de fabricação Soil Moisture Equipment Corp. Santa Barbara, CA (Figura 19B).

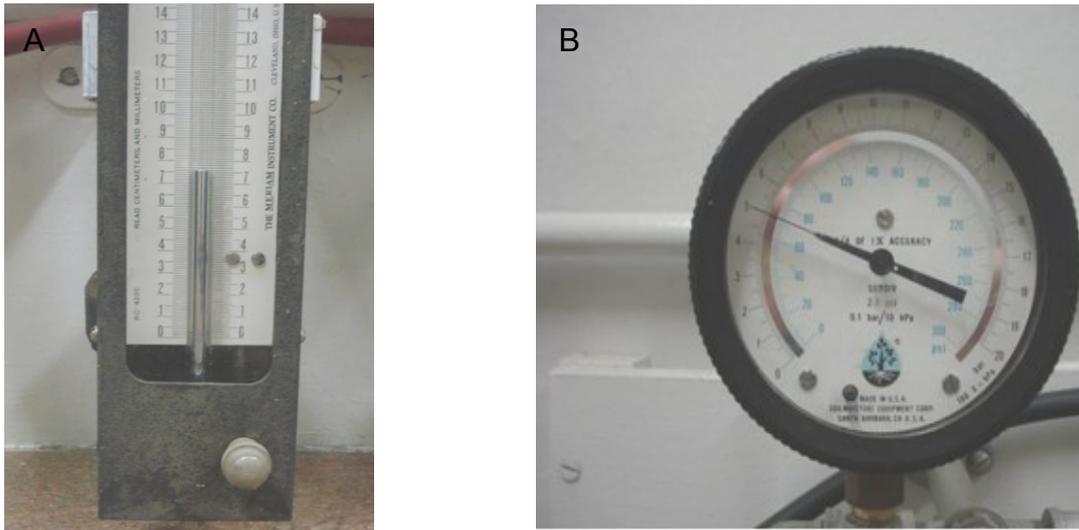


Figura 19 - (A) Manômetro de mercúrio; (B) manômetro analógico

O procedimento para a obtenção da umidade do solo, tanto para os pontos de tensão controlados pelo manômetro de mercúrio como pelo analógico, consiste em acondicionar as amostras de solo sobre a placa até que as mesmas atinjam a máxima drenagem da água contida nos poros correspondente àquela determinada pressão. Esse intervalo de tempo tem uma variação dependendo do tipo de solo e da pressão aplicada, ficando em média 168 horas por pressão aplicada. Ao atingir o equilíbrio hídrico em cada tensão, a amostra foi pesada para determinação do seu conteúdo de água, depois de submetidas à última tensão, foram secas em estufa a 105 °C durante 24 h (GARDNER, 1986) (Figura 20). Após o equilíbrio térmico em dessecador, foram determinadas as massas de sólidos e a tara (compreendendo cilindro de alumínio, material sintético e liga elástica). Calculando-se assim a densidade do solo, umidades a base de massa e posteriormente em volume.

Tanto para as mesas de tensão, quanto para as câmaras de pressão, o momento de equilíbrio das amostras em determinada tensão foi determinado pela

interrupção da drenagem, verificado visualmente pela ausência de gotas de água e formação de menisco nos tubos de saída (KLUTE, 1986).



Figura 20 - Estufa elétrica utilizada para secagem do solo

### 3.5.5 Determinação dos parâmetros da curva de retenção e índices estatísticos

Para a determinação dos parâmetros  $\theta_r$ ,  $n$  e  $\alpha$ , das curvas com base nos dados observados para os diferentes pontos de tensão estudados do conteúdo de água versus tensão para cada solo, foi utilizado o modelo de van Genuchten, (1980). Os parâmetros  $\theta_r$ ,  $n$  e  $\alpha$  foram obtidos com auxílio do software Retention Curve (RETC), (VAN GENUCHTEN et al. 1991) (Figura 21). Sendo que o parâmetro  $\theta_s$  foi determinado por meio da pesagem direta da amostra do solo saturado, antes de ser submetido ao processo de extração de água e, portanto, não foi objeto de ajuste. O parâmetro  $m$  é dependente de  $n$  e foi calculado pela eq. (17). Nesse modelo, o parâmetro  $\theta_s$  define a assíntota superior da curva, representando o conteúdo saturado de água no solo, enquanto  $\theta_r$  define a assíntota inferior da curva, representando o conteúdo residual de água no solo. O parâmetro  $n$  é adimensional e reflete a forma da curva e o parâmetro  $\alpha$  é expresso em  $\text{hPa}^{-1}$  e é afetado pelo valor da tensão da água no solo.

Com base nos parâmetros obtidos através do software RETC e utilizando a equação de van Genuchten (1980), eq. (16), foi possível determinar as umidades estimadas de todos os pontos e tensões estudadas, obtendo assim o erro entre as umidades observadas e estimadas.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|\Psi_m|)^n\right]^m} \quad (16)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (17)$$

Em que,

$\theta$  - Umidade volumétrica ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\Psi_m$  - Potencial matricial (hPa);

$\theta_r$  - Umidade residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_s$  - Umidade na saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$m$  e  $n$  - Parâmetros de ajuste.

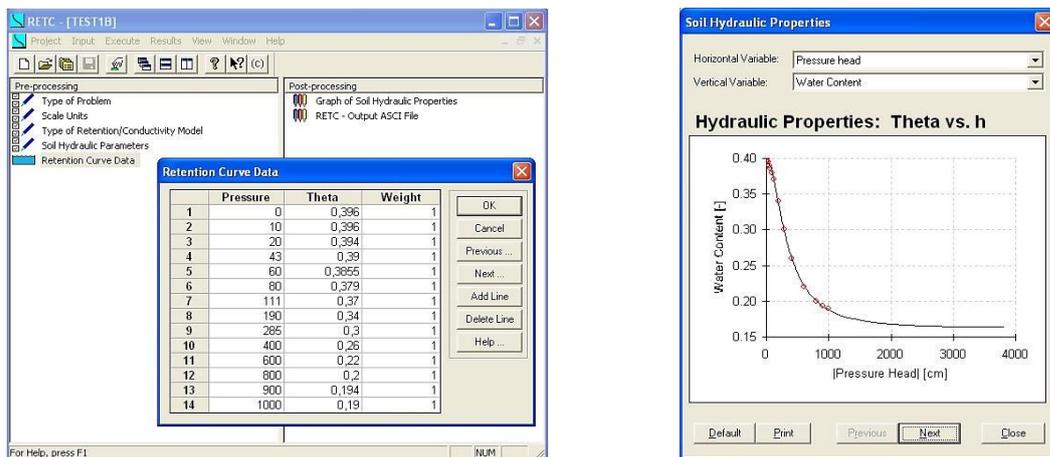


Figura 21 - Software RETC – Utilizado para gerar os parâmetros das curvas de retenção

Utilizando os dados observados de umidades para os dois tipos de solo, foram calculados os coeficientes estatísticos: médias, umidades máximas e mínimas, erro padrão da média (EPM) e coeficiente de variação (CV) (Tabela 4).

O erro padrão da média, eq. (18), é uma medida da precisão da média amostral dos dados observados. É obtida dividindo-se o desvio padrão, eq. (19) pela raiz quadrada do tamanho da amostra.

$$EPM = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (18)$$

Em que,

EPM - Erro padrão médio;

$\sigma$  - Desvio padrão;

$n$  - Tamanho da amostra.

$$\sigma = \left[ \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \right]^{0,5} \quad (19)$$

Em que,

$\sigma$  - Desvio padrão;

$x_i$ - Dados observados;

$\bar{x}$  - Média dos dados observados;

$n$  - Tamanho da amostra.

O coeficiente de variação é um índice que indica a dispersão dos valores relativamente à média e é calculado pela eq. (20).

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100 \quad (20)$$

Em que,

CV - Coeficiente de variação;

$\sigma$  - Desvio padrão;

$\bar{x}$  - Média dos dados observados.

Com posse das unidades volumétricas observadas da curva referencia e utilizando-se do software RETC foram obtidos dados estimados das unidades para todos os pontos e tensões estudadas. Para comparação entre os dados das unidades observadas e ajustadas foram realizadas as seguintes análises: coeficiente de determinação " $r^2$ ", que pode variar no intervalo de 0 a +1, eq. (21); coeficiente angular, índice de correlação " $r$ ", que pode variar de -1 a +1, e neste trabalho foi calculado de acordo com Silva e Barros Filho (2003) pela eq. (22); Índice de exatidão " $d$ " (WILLMOTT et al., 1985), que variam de 0 para nenhuma concordância, a +1, para concordância perfeita, eq. (23); desempenho ou concordância " $c$ " (Tabela 2) sugeridos por Camargo e Sentelhas (1997) através da eq. (24); e o erro padrão da estimativa (EPE) pela eq. (25).

$$r^2 = \frac{a \sum y + b \sum xy - n(\bar{y})^2}{\sum y^2 - n(\bar{y})^2} \quad (21)$$

Em que,

$r^2$  - Coeficiente de determinação;

a, b, n - Número de repetições;

x - Número de dados observados;

y - Número de dados estimados;

$\bar{y}$  - Média dos dados estimados.

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[ \sum (x_i - \bar{x})^2 \right] \times \left[ \sum (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (22)$$

Em que,

r - Índice de correlação;

$x_i$  - Dados observados;

$\bar{x}$  - Média dos dados observados;

$y_i$  - Dados estimados pelo modelo;

$\bar{y}$  - Média dos dados estimados pelo modelo.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - o| + |x_i - o|)^2} \right] \quad (23)$$

Em que,

d - Índice de concordância de Willmott;

$y_i$  - Teor de água no solo estimado pelo modelo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$x_i$  - Teor de água no solo observado ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

o - Média dos valores observados.

$$c = r \times d \quad (24)$$

Em que,

c - Índice de desempenho;

r - Índice de correlação;

d - Índice de exatidão.

O enquadramento do desempenho foi determinado com os limites apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites de qualificação para o índice de desempenho

Valor de "c"	Desempenho
0,81 a 0,90	muito bom
0,71 a 0,80	bom
0,51 a 0,70	mediano
0,41 a 0,50	sofrível
0,31 e 0,40	mau
e $\leq$ 0,30	péssimo

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (x_i - y_i)^2}{n-1}} \quad (25)$$

Em que,

EPE - Erro padrão da estimativa;

$x_i$  - Dados observados;

$y_i$  - Dados estimados;

n - Número de repetições.

Posteriormente, cada parâmetro do modelo de van Genuchten (1980), obtido dos diferentes pontos, ou seja, pares de umidade e tensão de água no solo, foi comparado ao parâmetro equivalente da curva referencia-A1. Os parâmetros foram submetidos à análise de variância (teste F) e suas médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5%.

### 3.5.6 Número de pontos e distribuição na curva de retenção

Como já mencionado anteriormente, a escolha dos números de pontos, bem como a distribuição destes pontos nas curvas de retenção foi realizada de forma

arbitrária sem nenhum critério específico, com exceção da curva contendo 10 pontos, que foi mantido propositalmente por ser esta a combinação utilizada como padrão no Laboratório de solos do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP. Para este trabalho optou-se pelo estudo envolvendo sete combinações diferentes de pontos e tensões (Tabela 3), incluindo a curva de 13 pontos (A1) que foi tomada como referência neste estudo.

Jorge et al. (2010), coloca como sendo sempre necessária a utilização do ponto de 15.000 hPa ao se utilizar o modelo de van Genuchten para elaboração de uma curva de retenção de água do solo. Caso contrário, segundo o autor é provável que se obtenham resultados incorretos de avaliação da retenção de água e, conseqüentemente, da disponibilidade de água para as plantas, assim como incertezas na determinação de indicadores da qualidade física do solo derivados da curva de retenção como o índice S proposto por Dexter, (2004). Com intuito de verificar esta situação, foi imposta a este trabalho uma combinação de pontos levando em conta somente os chamados pontos de baixa da curva de retenção, ou seja, pontos de 0 à 1.000 hPa. Portanto, excluindo-se o ponto de 15.000 hPa (Tabela 3). Para as demais combinações de pontos de tensão foi mantido o ponto de 15.000 hPa entre as combinações, como proposto por (JORGE et al.,2010).

Procurou-se priorizar na medida do possível neste trabalho tensões de até 1.000 hPa, pois para tensões abaixo desse valor o tempo gasto para as amostras de solo atingirem o equilíbrio físico-hídrico é menor, como estudado por Jorge et al. (2010).

Tabela 3 - Número e distribuição dos pontos nas curvas de retenção avaliadas no experimento para os dois tipos de solo

Número de pontos	Pontos de tensão avaliados (hPa)
4	0; 100; 700 e 15.000
5	0; 100; 300; 1.000 e 15.000
7	0; 40; 100; 300; 1.000; 5.000 e 15.000
8	0; 10; 20; 40; 100; 300; 700 e 1.000
9	0; 20; 40; 100; 300; 700; 1.000; 5.000 e 15.000
10	0; 10; 20; 40; 100; 300; 500; 1.000; 5.000 e 15.000
13(A1)	0; 10; 20; 40; 100; 200; 300; 500; 700; 1.000; 5.000; 10.000 e 15.000

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4 estão apresentados a média, o valor máximo e mínimo, o erro padrão da média e o coeficiente de variação (CV), das 9 repetições contendo 13 pares de pontos de umidade e tensão (curva referencia - A1) realizadas tanto para o solo arenoso quanto para o argiloso. Analisando os dados de CV e comparando com trabalho semelhante realizado por Jorge et al. (2010) onde os coeficientes de variação apresentaram valores entre 13 e 18%, os valores de CV obtidos neste trabalho para ambos os solos apresentaram maior precisão (CV menor que 10%). Esses valores de CV segundo Pimentel Gomes (2000) são considerados baixos e refletem a homogeneidade dos dados, o que é um indicativo da qualidade na determinação dos mesmos. No entanto, observa-se que existe um maior coeficiente de variação nos pares de pontos denominados pontos de baixa da curva, ou seja, com tensões que variam de 0 a 1.000 hPa. Para o solo arenoso esta variação pode ser observado entre 100 e 1.000 hPa. Quando analisado o solo argiloso, percebe-se que a variação do CV ocorre de forma mais acentuada entre 10 a 1.000 hPa. É importante destacar que esses pares de pontos estão situados em uma faixa que compreende tensões importantes utilizadas para prática do manejo da irrigação, pois a maior parte da água utilizada no manejo se encontra retida nesta faixa.

Observa-se na Tabela 4 que a quantidade de água retida no solo entre  $\theta_s$  e  $\theta_{300}$  hPa, em relação à diferença  $\theta_s - \theta_r$ , foi de 13,92% no solo arenoso e de 35,47% no solo argiloso, indicando que existe uma maior retenção de água nesta faixa de tensão para o solo de textura argilosa. Esses valores apresentam coerência quando comparados aos obtidos por Silva et al. (2006) para condições semelhantes de granulometria, sendo que este autor utilizou para esta observação a água retida no solo até a tensão de 350 hPa. Observa-se também que existe uma diferença nos valores de  $\theta_r$  entre os tipos de solos analisados, verificando maior retenção de água para o solo argiloso, isso acontece pelo fato deste tipo de solo apresentar maior percentagem de argila.

Tabela 4 - Parâmetros estatísticos obtidos da média de 9 repetições dos dados observados utilizados para caracterização da curva de retenção referência

Solo	$\theta$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	Tensões (hPa)												
		0	10	20	40	100	200	300	500	700	1.000	5.000	10.000	15.000
Arenoso	Média	0,5186	0,4598	0,4219	0,3314	0,2343	0,1621	0,1215	0,1035	0,0926	0,0857	0,0662	0,0619	0,0573
	Máxima	0,5413	0,4769	0,4329	0,3392	0,2600	0,1723	0,1285	0,1119	0,1000	0,0898	0,0683	0,0642	0,0595
	Mínima	0,4914	0,4406	0,4047	0,3188	0,2174	0,1533	0,1153	0,0971	0,0872	0,0795	0,0642	0,0583	0,0542
	EPM	0,0044	0,0034	0,0027	0,0023	0,0045	0,0022	0,0016	0,0015	0,0013	0,0011	0,0005	0,0005	0,0005
	CV (%)	2,5446	2,1992	1,9460	2,0464	5,7555	4,1067	3,8695	4,4775	4,2770	3,7979	2,0519	2,6340	2,4899
Argiloso	Média	0,625	0,553	0,475	0,402	0,358	0,324	0,292	0,275	0,261	0,250	0,120	0,114	0,109
	Máxima	0,6382	0,5669	0,4928	0,4140	0,3680	0,3306	0,2966	0,2798	0,2664	0,2561	0,1216	0,1154	0,1101
	Mínima	0,6106	0,5279	0,4557	0,3867	0,3463	0,3133	0,2827	0,2657	0,2536	0,2433	0,1179	0,1121	0,1080
	EPM	0,0028	0,0044	0,0038	0,0029	0,0023	0,0019	0,0015	0,0015	0,0013	0,0012	0,0004	0,0004	0,0002
	CV (%)	1,3527	2,3964	2,4182	2,1900	1,9572	1,7466	1,5784	1,6778	1,4587	1,4422	0,9863	0,9413	0,6417

EPM - Erro padrão da média e CV – Coeficiente de variação

As observações referentes aos parâmetros obtidos nos diferentes solos e nas combinações de pontos e tensões estudadas são apresentadas na Tabela 5.

Para os parâmetros  $\theta_s$ ,  $n$  e  $m$  observa-se um CV considerado baixo, refletindo alta precisão dos dados para ambos os solos, de acordo com Pimentel-Gomes, (2000). Para os parâmetros  $\theta_r$  e  $\alpha$  nota-se um CV bastante heterogêneo para os diferentes solos e combinações de pontos de umidade e tensão. No solo arenoso, o parâmetro  $\theta_r$  (parâmetro que define a umidade residual) possui coeficiente de variação considerado baixo para as curvas contendo os seguintes números de pontos de tensões: 13, 10, 9, 7, 5 e 4. Para a curva contendo 8 combinações de pontos de tensões e umidade do solo, observa-se um coeficiente de variação de 65,30% considerado muito alto. Esse valor de CV pode ser facilmente explicado já que se trata da curva contendo as chamadas tensões de baixa, ou seja, tensões de no máximo 1.000 hPa. Portanto, o ponto da umidade residual (15.000 hPa) não foi utilizado.

Para o solo argiloso, o menor CV de  $\theta_r$  observado na Tabela 5 foi obtido na curva referencia (13 pontos de tensões - A1), mesmo assim, o valor foi de 44,48%, o que é considerado muito alto. No entanto, nota-se que para a curva contendo 8 combinações de pontos de tensão e umidade (curva que exclui a tensão de 15.000 hPa) apresenta um valor ainda maior, CV de 111,42%. Esses dados quando comparados aos obtidos por Grego e Vieira (2005), que registraram valores em torno de 9% são considerados altos e não apresentam coerência quando analisados levando em consideração as diferentes combinações de números de pontos e tensões.

O Parâmetro  $\alpha$  obtido para o solo arenoso nos diferentes pares de umidades e tensões de água no solo, apresentou um CV de 8,72% (considerado baixo) apenas para a curva contendo 9 pares de pontos. Para as curvas contendo 13, 10, 8, 7 e 5 pares de pontos, os coeficientes de variação foram considerados médios e de boa precisão. No entanto, a curva contendo 4 pares de pontos apresentou um CV de 20,14% o que é considerado alto e com baixa precisão. Considerando a curva contendo 8 pares pontos (curva que exclui o ponto de 15.000 hPa) esperava-se um valor de CV maior, o que não aconteceu.

Para o solo argiloso, os valores de CV para o parâmetro  $\alpha$  das curvas contendo 13 e 8 pares de pontos foram considerados alto e com baixa precisão. Já a

curva contendo 4 pares apresentou o menor CV (7,25% considerado baixo, tendo alta precisão). No entanto, apesar do parâmetro  $\alpha$  apresentar coeficientes de variação totalmente discrepantes e com valores de CV altos entre os diferentes pares de pontos estudados, ainda apresentaram valores bem menores do que os obtidos por Grego e Vieira, (2005) que constataram valores em torno de 95%. Portanto, com base apenas nos coeficientes de variação dos parâmetros do modelo de van Genuchten fica impossível afirmar, para ambos os solos, a melhor opção para a escolha do menor número de pares de pontos de umidade e tensão necessários para a elaboração da curva de retenção.

Tabela 5 - Parâmetros de ajuste das curvas de retenção, gerados a partir de dados observados de 9 repetições segundo modelo de van Genuchten (1980), para os dois tipos de solo

Nº pares	Solo	P. Est	Parâmetros				
			$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	n	m
13 <sup>(A1)</sup>	Are	Média	0,5095	0,0497	0,0410	1,6807	0,4047
		CV (%)	3,06	5,52	10,80	2,32	3,41
	Arg	Média	0,6051	0,0006	0,1171	1,2291	0,1864
		CV (%)	1,44	44,48	21,84	0,66	2,89
10	Are	Média	0,5100	0,0483	0,0414	1,6724	0,4017
		CV (%)	3,00	6,73	10,02	2,46	3,66
	Arg	Média	0,6201	0,0002	0,1156	1,2207	0,1808
		CV (%)	1,41	54,08	18,54	0,50	2,25
9	Are	Média	0,5171	0,0500	0,0412	1,6918	0,4085
		CV (%)	2,83	6,93	8,72	2,61	3,78
	Arg	Média	0,6174	0,0004	0,1275	1,2146	0,1767
		CV (%)	1,31	84,65	16,79	0,47	2,19
8	Are	Média	0,5129	0,0234	0,0445	1,5768	0,3649
		CV (%)	2,91	65,301	9,44	3,92	6,87
	Arg	Média	0,5985	0,0003	0,1287	1,1906	0,1601
		CV (%)	2,46	111,42	21,76	0,90	4,74
7	Are	Média	0,5178	0,0511	0,0409	1,6959	0,4102
		CV (%)	2,63	4,81	10,96	1,91	2,76
	Arg	Média	0,6201	0,0004	0,1209	1,2245	0,1833
		CV (%)	1,29	61,73	16,13	0,63	2,79
5	Are	Média	0,5186	0,0581	0,0268	1,9355	0,4823
		CV (%)	2,54	4,37	18,24	4,66	5,10
	Arg	Média	0,6234	0,0003	0,1055	1,2188	0,1795
		CV (%)	1,33	82,16	10,97	0,33	1,51
4	Are	Média	0,5186	0,0541	0,0303	1,8273	0,4517
		CV (%)	2,54	4,62	20,14	4,51	5,61
	Arg	Média	0,6171	0,0006	0,1084	1,1906	0,1599
		CV (%)	1,32	55,26	7,25	1,54	8,05

$\theta_s$  é o conteúdo volumétrico da água no solo saturado ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $\theta_r$  é o conteúdo volumétrico da água residual no solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $\alpha$  é o fator de ajuste ( $\text{hPa}^{-1}$ ) e n e m são fatores de ajuste (sem dimensão), sendo que  $m=1-1/n$ .

Analisando a Figura 22, referente aos índices estatísticos: coeficiente angular, índice de concordância de Willmott, coeficiente de correlação, índice de confiança ou desempenho, coeficiente de determinação e erro padrão da estimativa, nota-se uma melhor combinação de resultados para as curvas contendo 7 pontos de tensões, ou seja, (0, 40, 100, 300, 1.000, 5.000 e 15.000 hPa), quando comparadas às de 4, 5 e 8 pontos de tensões, principalmente para o solo arenoso. Os gráficos A e B da Figura 22, estão apresentados com escalas distintas, para melhor diferenciação dos valores encontrados.

Portanto, com base apenas nestes índices e levando-se em conta a opção pela escolha da curva com menor número de pontos, tem-se um indicativo de que a curva contendo 7 pares de pontos de umidade e tensão, é a que deve ser adotada por apresentar melhores resultados estatísticos em relação as curvas contendo 8, 5 e 4 pontos de tensões.

Para os dois tipos de solo e para todas as combinações de pontos, nota-se que os coeficientes angulares são muito próximos. Quando analisado o índice de concordância de Willmott, o cenário é parecido ao apresentado pelo coeficiente angular. O índice de confiança ou desempenho “c” foi considerado ótimo para ambos os solos segundo Almeida et al. (2010), com valores acima de 90% para todos os pares de pontos estudados.

Com relação ao erro padrão da estimativa (EPE) nota-se que os maiores valores foram encontrados nas curvas com 8, 5 e 4 pares de pontos, para ambos os solos.

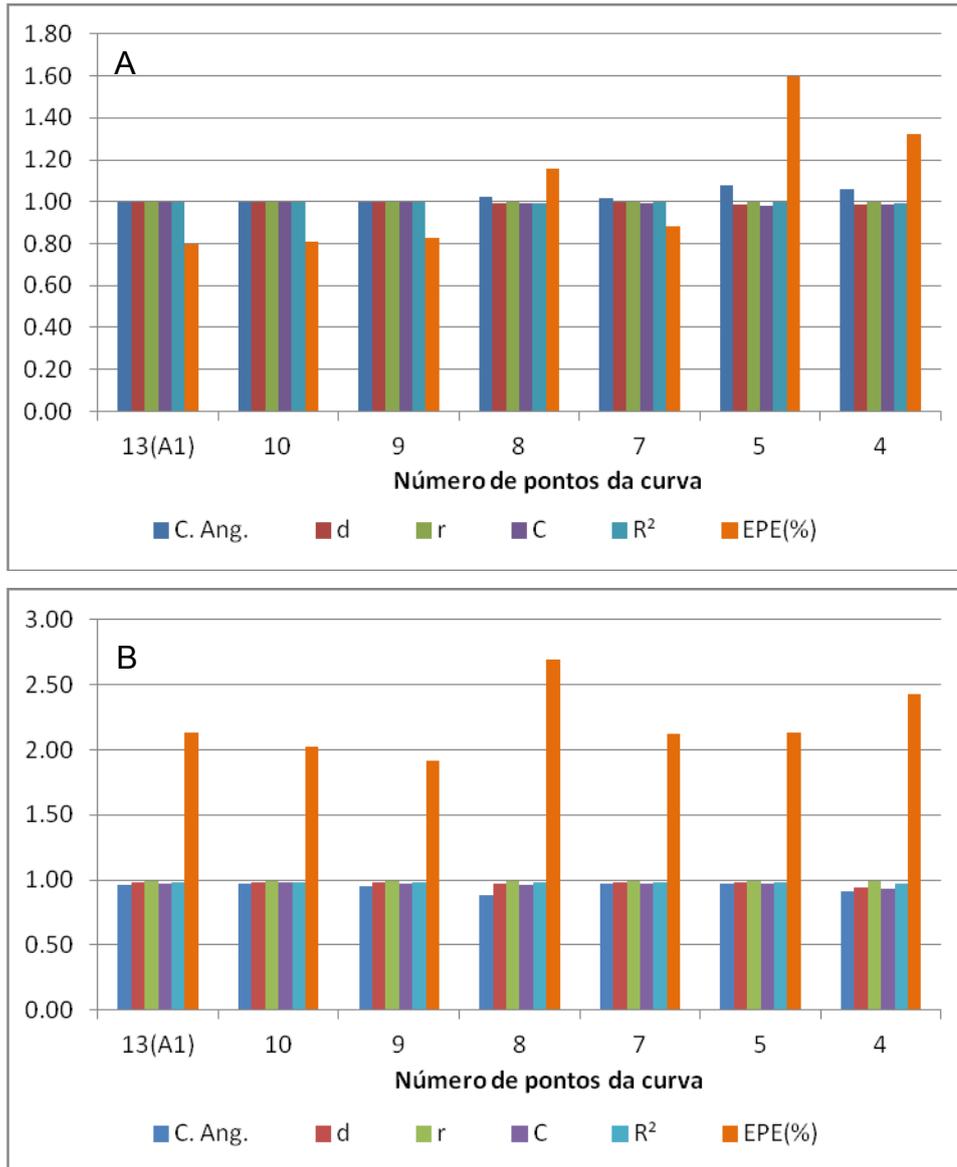


Figura 22 - Índices estatísticos obtidos de médias de nove repetições do solo arenoso (A) e argiloso (B); C.Ang= coeficiente angular; d= índice de concordância de willmott; r=Índice de correlação; R<sup>2</sup>= Coeficiente de determinação; EPE%= Erro padrão da estimativa

Comparando os valores observados e estimados de  $\theta$  com base no modelo de van Genuchten (Figura 23), pode-se observar pelo seu maior ou menor distanciamento da linha 1:1, que os ajustes subestimam ou superestimam os dados de teor de água no solo. Observa-se que as regressões realizadas com as curvas contendo 13(A1), 10, 9 e 7 pares de pontos de umidade e tensão, apresentam menor distanciamento em relação à linha 1:1 (melhor coeficiente angular), e intercepto mais próximo de zero se comparado às curvas contendo 8, 5 e 4 pares de ponto, portanto apresentando melhor confiabilidade.

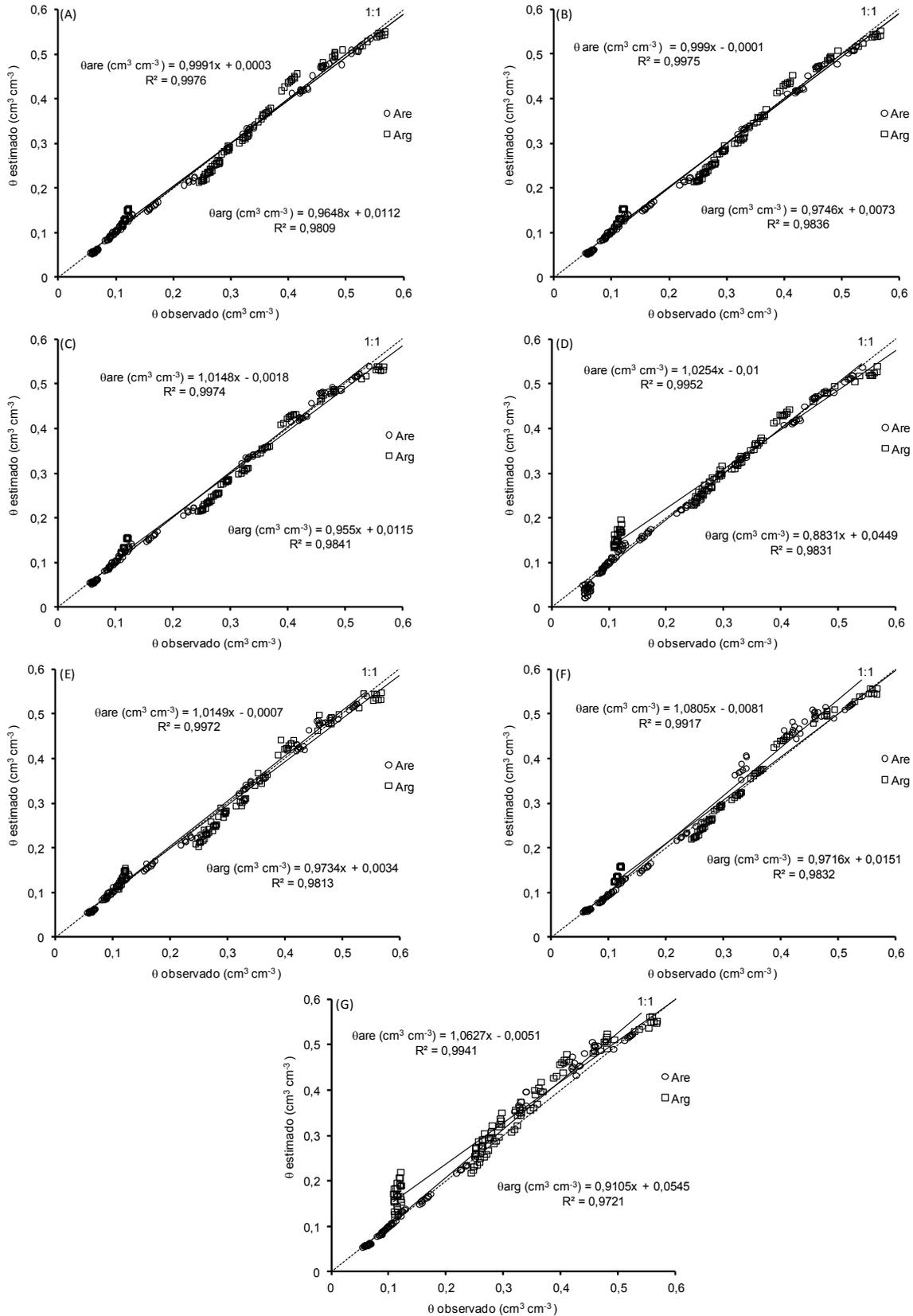


Figura 23 - Comparações de dados observados e estimados do teor de água ( $\theta$ ) das curvas de retenção de água no solo; A= 13 pontos(A1); B= 10 pontos; C= 9 pontos; D= 8 pontos; E= 7 pontos; F= 5 pontos e G= 4 pontos

Analisando os dados estimados para todas as situações trabalhadas, verificou-se que as combinações de valores e os números de tensões utilizadas, influenciaram no ajuste dos dados pelo modelo matemático de van Genuchten. Nota-se que para o solo arenoso as curvas geradas envolvendo 7, 9 e 10 pares de pontos (Tabela 6), fizeram com que todos os parâmetros do modelo de van Genuchten ( $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$  e  $\theta_r$ ) apresentassem valores estatisticamente iguais ( $p < 0,01$ ) quando comparados à curva referência (A1 - 13 pares de pontos). O critério de seleção utilizado para escolha das curvas estatisticamente iguais à A1 foi o de que todos os valores dos parâmetros do modelo de van Genuchten ( $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  e  $\theta_r$ ) fossem estatisticamente iguais, pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

Estes resultados são similares aos obtidos por Jorge et al (2010), em trabalho semelhante realizado no município de Jaboticabal SP com exceção do autor utilizar solo indeformado ao invés de deformado, oriundo de área trabalhada com plantio direto. Este autor realizou um grande número de combinações aleatórias de pontos de umidade e as correspondentes tensões, e em duas oportunidades conseguiu obter curvas contendo 5 pares de pontos que apresentaram todos os parâmetros do modelo estatisticamente iguais à curva referência.

Tabela 6 - Valores médios dos parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) utilizados para estimativa da umidade no solo arenoso

Número de tensões	Parâmetros de ajuste do modelo			
	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	$n$	$m$
13	0,0497 b	0,0410 a	1,6807 c	0,4047 c
10	0,0483 b	0,0414 a	1,6724 c	0,4017 c
9	0,0501 b	0,0412 a	1,6918 c	0,4085 c
7	0,0511 b	0,0409 a	1,6959 c	0,4102 c
8	0,0234 c	0,0445 a	1,5768 d	0,3649 d
5	0,0581 a	0,0268 b	1,9355 a	0,4823 a
4	0,0541 a	0,0303 b	1,8273 b	0,4517 b
Média	0,0478	0,0381	1,7258	0,4177
CV (%)	13,26	12,12	3,46	4,66
Teste F	28,45**	18,75**	35,12**	34,45**

Médias seguidas de mesma letra nas colunas, não diferem entre si pelo teste estatístico (Scott-knott  $p > 0,05$ ), \*\*significativo a 1 %

Outra questão fundamental a ser observada é a importância do ponto gerado com a tensão de 15.000 hPa. Nota-se que para o solo arenoso, apesar da curva conter 8 pares de pontos, o fato de não apresentar nesta combinação a tensão 15.000 hPa (Tabela 3), resulta em três parâmetros do modelo de van Genuchten que diferiram estatisticamente da curva referência (A1). Esse fato implica afirmar que o modelo não estimou adequadamente o conteúdo de água retido do solo na tensão de 15.000 hPa e que, ao se utilizar o modelo de van Genuchten para elaboração de uma curva característica de retenção de água do solo, deve-se incluir esta tensão no conjunto de tensões utilizadas, reafirmando o que já foi constatado em outros trabalhos como o de Jorge et al (2010). Caso contrário, é provável que se obtenha resultados incorretos de avaliação da retenção de água pelo solo e, conseqüentemente, da disponibilidade de água para as plantas.

Para o solo argiloso (Tabela 7) observa-se praticamente a mesma situação encontrada no solo arenoso, no entanto a curva contendo 8 pares de pontos apresentou apenas 2 parâmetros estatisticamente diferentes quando comparado à curva referência-A1, ao invés de 3 como observado para o solo arenoso.

Tabela 7 - Valores médios dos parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) utilizados para estimativa da umidade no solo argiloso

Número de tensões	Parâmetros de ajuste do modelo			
	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	n	m
13	0,589 10 <sup>-3</sup> a	0,1171 a	1,2291 a	0,1864 a
10	0,222 10 <sup>-3</sup> a	0,1156 a	1,2207 a	0,1807 a
9	0,411 10 <sup>-3</sup> a	0,1275 a	1,2146 a	0,1767 a
7	0,444 10 <sup>-3</sup> a	0,1209 a	1,2245 a	0,1833 a
8	0,289 10 <sup>-3</sup> a	0,1287 a	1,1906 b	0,1601 b
5	0,333 10 <sup>-3</sup> a	0,1055 b	1,2188 a	0,1795 a
4	0,578 10 <sup>-3</sup> a	0,1084 b	1,1906 b	0,1598 b
Média	0,495 10 <sup>-3</sup>	0,1134	1,2127	0,1752
CV (%)	69,07	17,13	1,80	3,84
Teste F	2,20 <sup>ns</sup>	5,08 <sup>**</sup>	23,75 <sup>**</sup>	23,41 <sup>**</sup>

Médias seguidas de mesma letra nas colunas, não diferem entre si pelo teste estatístico (Scott-knott p > 0,05). \*\*significativo a 1 %. <sup>ns</sup> não significativo

Levando em consideração as situações estudadas, podemos afirmar que para ambos os solos, que a escolha da curva contendo 7 pares de pontos de umidade e com as tensões (0, 40, 100, 300, 1.000, 5.000 e 15.000 hPa), é a menor combinação de pontos que melhor representa a relação das umidades versus tensões, como podemos observar graficamente na Figura 24.

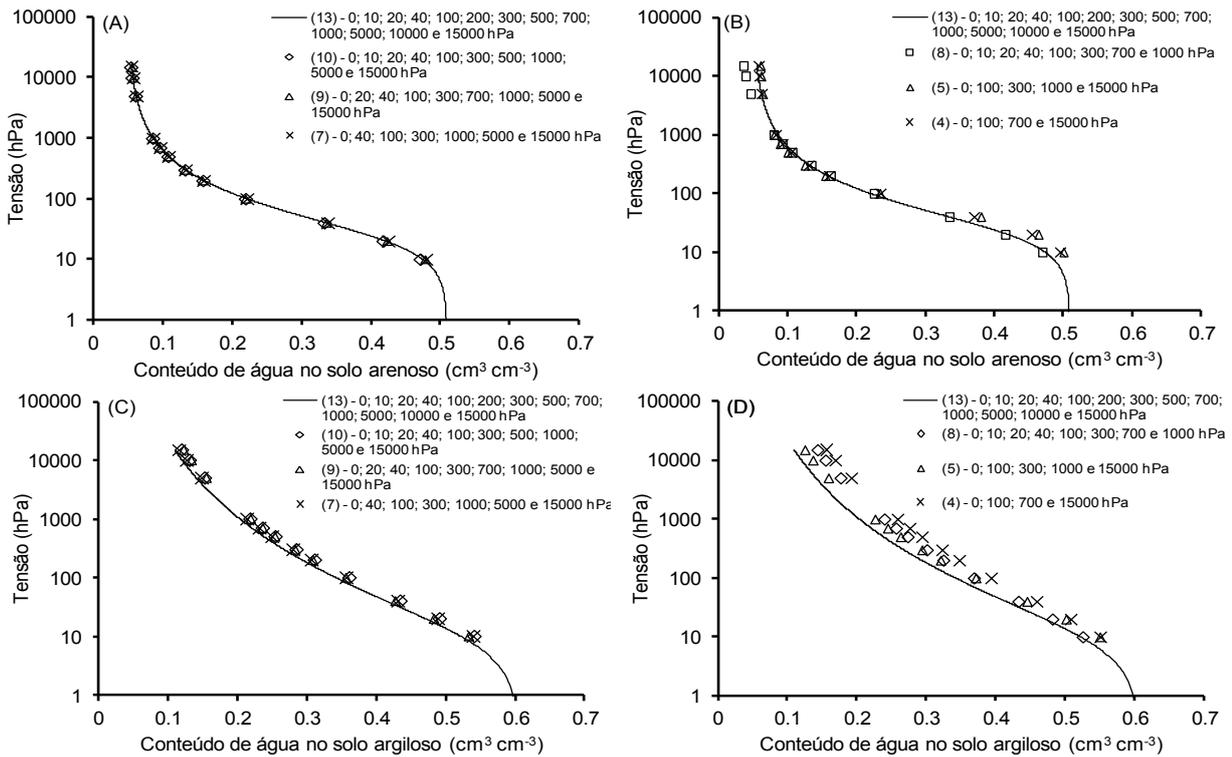


Figura 24 - Curvas de retenção de água no solo que não diferem estatisticamente (A e C) e que diferem (B e D) da curva de referencia (A1) pelo teste F ( $p < 0,01$ ) para ambos os solos

Na Figura 24, as curvas de retenção de água no solo que apresentaram pelo menos um dos parâmetros do modelo de van Genuchten com valor diferente da curva referencia A1, foram consideradas estatisticamente diferentes de A1, quando analisados pelo teste F ( $p < 0,01$ ). Observa-se nos gráficos B e D (solo arenoso e argiloso respectivamente) que o modelo não consegue ajustar as curvas contendo 8 pares de pontos, ou seja, curva que exclui o ponto de 15.000 hPa. O que o torna indispensável para o levantamento da curva de retenção.

Um detalhe importante deve ser observado: não se pode afirmar que qualquer outra formação contendo 7 pares de pontos obtidos aleatoriamente, possa oferecer a mesma precisão nos resultados. Com base nos resultados estatísticos pode-se afirmar que utilizando os 7 pontos de tensões descritos no trabalho para os

dois tipos de solos, é possível conseguir resultados com a mesma acurácia dos obtidos pela curva referencia (13 pontos de tensões A1).

Optando-se pela curva contendo 7 pares de pontos, verifica-se uma redução de tempo na obtenção dos resultados quando comparados a curva padrão, que pode variar de um caso para outro dependendo da textura do solo.



## **5 CONCLUSÃO**

Neste trabalho a curva de retenção de água no solo obtida a partir de 7 pares de pontos de umidade e tensão, demonstrou-se suficiente, para ambos os solos, sem comprometer os resultados.

Para a determinação da curva de retenção de água no solo com menor número de pontos, a tensão de 15.000 hPa deve ser utilizada na combinação de tensões, quando se utiliza o modelo de van Genuchten (1980).

Utilizando 7 pares de pontos de umidade e tensão é possível reduzir o tempo para a obtenção da curva, quando comparado ao padrão utilizado atualmente pelo Laboratório de Física do solo do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP.



## REFERÊNCIAS

- ADÂMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L. G. de; MADEIRA NETTO, J. Caracterização da região dos Cerrados. In: GOEDERT, J. W. **Solos dos cerrados**. Brasília: Embrapa-CPAC/Nobel, 1985. p. 33-74.
- ALBRECHT, W.A.; MCCALLA, T.M. The colloidal clay fraction of soil as a cultural medium. **American Journal of Botany**, New York, v. 25, n. 6, p. 403-407, June 1938.
- ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. 2008, 103p. Tese apresentada para a obtenção do título de Doutor em Agronomia. Solos e Nutrição de Plantas. ESALQ/USP Piracicaba, 2008.
- ALMEIDA, B. G.; ARAÚJO, E. M.; CAVALCANTE JUNIOR E. G.; OLIVEIRA J. B.; ARAÚJO E. M.; NOGUEIRA B. R. C. Comparação de métodos de estimativa da eto na escala mensal em Fortaleza - CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza – CE. v.4, n.2, p.93–98, 2010.
- ANDRADE, C. L. T.; BORGES JUNIOR, J.C.F.; COUTO, L. **Características Físico-hídricas e dinâmica de água no solo**. In: ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação**, Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2008. P.71-149.
- ARRUDA, F. B., ZULLO Jr., J., OLIVEIRA, J. B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, n.1, p.11-15, 1987.
- ARYA, L. M.; PARIS, F. A. Physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 6, p. 1023-1030, Nov./Dec. 1981.
- BALL, B. C.; HUNTER, R. The determination of water release characteristics of soil cores at low suctions. **Geoderma**, Amsterdam, v.43, p. 195-212, 1988.
- BARTH, H. G.; SUN, S-T. Particle size analysis. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 57, n. 5, p. 151R-175R, Apr. 1985.
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. 4th ed. New York: John Wiley, 1972. 498 p.

BELL, M. A.; VAN KEULEN, A. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.59, p.865-871, 1995.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & GUIMARAES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 975-983, 2008.

BLOTT, S. J.; PYE, K. Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: an experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape. **Sedimentology**, Oxford, v. 53, n. 3, p. 671–685, June 2006.

BOUYOUCOS, G. J. A new, simple and rapid method for determination the moisture equivalent of soils, and the role of soil colloids on this moisture equivalent. **Soil Science**, New Brunswick, v. 27, p. 233-241, 1929.

BOUYOUCOS, G. J. A recalibration of the hydrometer method for mechanical analysis of soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 43, n. 9, p. 434–438, Sept. 1951.

BOUYOUCOS, G. J. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, n. 5, p. 464–465, Sept./Oct. 1962.

BOUYOUCOS, G. J. The hydrometer as a new method for mechanical analysis of soils. **Soil Science**, New Brunswick, v. 23, n. 5, p. 343–352, Jan./June 1927.

BRADY, N. C.; BUCKMAN, H. O. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 647 p.

BRIGGS, L. J.; McLANE, J. W. Moisture equivalent determinations and their application. **Proceedings of the American Society of Agronomy**, Washington v. 2, p. 138-147, 1910.

CAMARGO O. A.; MONIZ A.C.; JORGE J. A.; VALADARES J. M. A. S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas**, Campinas: IAC, 2009. P46-47. (Boletim Técnico, 106).

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n.1, p. 89-97, 1997.

CARVALHO, J. M.; LIMA, L. A. Influência da adição de hidróxido de sódio na retenção de água de um Latossolo Vermelho-Escuro. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.24, n.2, p.450-457, 2000.

CASAGRANDE, A. **Die Araometer-Methode zur bestimmung der kornverteilung von boden und anderen materialien**, Berlin: Julius Springer, 1934. 56p.

CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I, Regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n. 4, p. 701-709, 2000.

CHAHAL, R. S. Effect of entrapped air and suction on matric suction. **Soil Science**, Baltimore, v.102, p.131-134. 1966.

CHAHAL, R. S. Effect of temperature and trapped air on matric suction. **Soil Science**, Baltimore, v.100, p.262-266. 1965.

CHAHAL, R. S. Effect of temperature and trapped air on the energy status of water in porous media. **Soil Science**, Baltimore, v.98. p.107-112. 1963.

CHAKRABORTY, D.; CHAKRABORTY, A.; SANTRA, P.; TOMAR, R. K.; GARG, R. N.; SAHOO, R. N.; CHOUDHURY, S. G.; BHAVANARAYANA, M.; KALRA, N. Prediction of hydraulic conductivity of soils from particle-size distribution. **Current Science**, Bangalore, v. 90, n. 11, p. 1526-1531, June 2006.

CHAUDHARI, S. K.; SINGH, R.; KUNDU, D. K. Rapid textural analysis for saline and alkaline soils with different physical and chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 2, p.431-441, Mar./Apr. 2008.

CHILDS, E. C. The use of soil moisture characteristics in soil studies. **Soil Science**, Baltimore, v.50, p.239-252.1940.

COMBER, N. M.; DYER, B.; HENDRICK, J.; ROBINSON, G. W.; WALLACE, T.; KEEN, B. A. The mechanical analysis of soils: a report on the present position, and recommendations for a new official method. **Journal of Agricultural Science**. Cambridge, v. 16, n. 1, p. 126-144, Jan. 1926.

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.

DANIELSON, R. E. & SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, A., Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, **American Society of Agronomy**. 1986. p.443-461.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201-214. 2004.

DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A. & GATE. O. P. A method for prediction of soil penetration resistance. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.93, n.2, p.412-419, 2007.

ELLIOTT, E. T.; HEIL, J. W.; KELLY, E. F.; CURTIS MONGER, H. Soil structural and other physical properties. In: ROBERTSON, G.P; BLEDSOE, C.S.; COLEMAN, D.C.; SOLLINS, P. (Ed.). **Standard soil methods for long-term ecological research**. New York: Oxford University Press, 1999. p. 74-85.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

FREITAS JÚNIOR, E.; SILVA, E. M. Uso da centrífuga para a determinação da curva de retenção de água do solo, em uma única operação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Planaltina, DF. v.19, p.1423-1428, 1984.

GARDNER, W. H. **Water content**. In: KLUTE, A., Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2<sup>a</sup> ed. Madison, **American Society of Agronomy**, Washington, p.493-544. 1986.

GEE, G. W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. Methods of soil analysis. 3<sup>a</sup> ed. **Soil Science Society of America**, Madison, p. 255-293, 2002.

GHANBARIAN, B.; LIAGHAT, A. M. Prediction soil water retention curve from soil particle-size analysis using fractal geometry. **Geophysical Research Abstracts**, Katlenburg, v. 9, p. 63-80, 2007.

GOMES, P. **Curso de estatística experimental**. 14.ed. Piracicaba: Degaspari, 2000. 477 p.

GOOSSENS, D. Techniques to measure grain-size distributions of loamy sediments: a 93 comparative study of ten instruments for wet analysis. **Sedimentology**, Oxford, v. 55, n.1, p. 65-96, Feb. 2008.

GREGO, R. C.; VIEIRA, S.R. variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 29, p.169-177, 2005.

HAINES, W. B. Studies in the physical properties of soil. **Journal of Agriculture Science**, Toronto, v. 20, p.97-116, 1930.

HILLEL, D. Soil and Water: Physical Principles and Processes, Londres: Academic Press, p. 29-77, 1971.

HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer function developed for tropical soils. **Geoderma**, Amsterdam 108:155-180, 2002.

HWANG, S. I.; POWERS, S. E. Using particle-size distribution models to estimate soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, n. 4, p. 1103-1112, July/Aug. 2003.

JORGE, R. F.; CORÁ, J. E.; BARBOSA, J. C. **Número mínimo de tensões para determinação da curva característica de retenção de água de um latossolo vermelho eutrófico sob sistema de semeadura direta**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v34, p.1831-1840, 2010.

JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil physics**. 5. ed. New York: John Wiley, 1991. 328 p.

KELLER J. M.; GEE, G. W. Comparison of American Society of testing materials and soil science society of america hydrometer methods for particle-size analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 4, p.1094-1100, July/Aug. 2006.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo, Editora Agronômica 'Elos', 1979. 124 p.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2. Ed. São Paulo: Nobel, 1988. 408 p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. A faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo de um perfil de um Latossolo roxo. **Ciência Rural**, Santa Maria v.30, p.959-964, 2000.

Klein, V.A; Baseggio, M.; Madalosso, T.; Marcolin, C.D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com Psicrômetro, **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.7, p.1550-1556, jul, 2010.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. **Soil Science Society of America**, Madison, p. 635-662. 1986.

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. **Soil Science Society of America**, Madison, p.687-734.1986.

KRUMBEIN, W. C. A history of the principles and methods of mechanical analysis. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, v. 2, n. 2, p. 89-124, Aug. 1932.

LEAMER, R. W.; SHAW, B. A simple apparatus for measuring noncapillary porosity an extensive scale. **Journal American Society Agronomy**, Washington v. 33, p.1003-1008, 1941.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: P. L. Libardi, 2000. 509 p.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no Solo**. ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, Piracicaba, 1995. 497p.

LIU, T. K.; ODELL, R. T.; ETTER, W. C.; THORNBURN, T. H. A comparison of clay contents determined by hydrometer and pipette methods using reduced major axis analysis. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v. 30, n. 6, p. 665-669, Nov./Dec. 1966.

LOVELAND, P. J.; WHALLEY, W. R. Particle size analysis. In: SMITH, K.A.; MULLIN, C.E. **Soil and environmental analysis: physical methods**. 2<sup>a</sup> ed. New York: Marcel Dekker, 2000. cap. 7, p. 281-314.

LUCAS, J. F. R. **Obtenção da curva de retenção da água no solo pela câmara de compressão triaxial e pelo papel filtro**. 2010, 63p. Dissertação de mestrado - UNIOESTE, Cascavel PR. 2010.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 495-502, 2008.

MALCOM, J. R.; ANDRÉE, D. C. Water release characteristics. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. **Soil analysis: physical methods**. New York: M. Dekker, 1991. p. 111-160.

MARTINEZ, M. A.; TIMM, L. C.; MARTINS, J. H.; FERREIRA, P. A. Efeito da textura do solo sobre os parâmetros de alguns modelos matemáticos usados para estimar a curva de retenção de água no solo. **Revista Engenharia na Agricultura**, Vicoso v. 4, p. 1-9, 1995.

McCAVE, N.; SYVITSKI, J. P. M. Principles and methods of geological particle size analysis. In: SYVITSKI, J.P.M. **Principles, methods, and application of particle size analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. chap. 1, p. 3-21.

McTAINSH, G. H.; LYNCH, A. W.; HALES, R. Particle-size analysis of aeolian dusts, soils and sediments in very small quantities using a coulter multisizer. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v. 22, n. 13, p. 1207–1216, 1997.

MEDEIROS, S. M. **Determinação da curva de retenção de água através de amostras submetidas à centrifugação**. 1987, 74p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1987.

MILLER, W. P.; RADCLIFFE, D. E.; MILLER, D. M. An historical perspective on the theory and practice of soil mechanical analysis. **Journal of Agronomic Education**, Madison, v. 17, n. 1, p. 24-28, 1988.

MINASNY, B.; MCBRATNEYA, A. B.; FIELDA, D. J.; TRANTERA, G.; MCKENZIEB, N. J.; BROUGHCH, D. M. Relationships between field texture and particle-size distribution in Australia and their implications. **Australian Journal Soil Research**. Collingwood, v. 45, n. 6, p. 428–437, 2007.

MORAES, S. O. **Heterogeneidade hidráulica de uma terra roxa estruturada**. 1991, 141p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz " ESALQ/USP. Piracicaba, 1991.

MORAES, S. O.; LIBARDI, P. L. & DOURADO NETO, D. Problemas metodológicos na obtenção da curva de retenção da água no solo. **Scientia Agricola**. Piracicaba v. 50, p.383-392, 1993.

MURRELL, M. L. An investigation of prehistoric water management in the chupadera arroyo basin, Central New Mexico. Las Cruces: New Mexico State University, **Water Resources Research Institute**, 2006. 127p.

ODÉN, S. **An integral method for determination of moisture retention curves by centrifugation**. Grundförbättring, Uppsala, v. 27, p.137-143, 1976.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela “mesa de tensão” em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Campinas, v. 3, p.197-200, 1968.

PECK, A. J. Change of moisture tension with temperature and air pressure: theoretical. **Soil Science**, Baltimore, v.89, p.303-310. 1960.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada.** 2004, 253p. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo:** com problemas resolvidos. Curitiba: C. L. Prevedelo, 1996. 446 p.

REEVE, M. J.; SMITH, P. D.; THOMASSON, A. J. The effect of density on water retention properties of field soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.24, p.355-367, 1973.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** São Paulo: Manole, 1990.188p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera:** Conceitos Processos e Aplicações. São Paulo: Manole, 2004. 478p.

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L.; ENSMINGER, L. E.; CLARK, F. E. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling.** Madison: **American Society of Agronomy**, Washington, p.128-152. 1965.

RICHARDS, L. A.; FIREMAN, M. **Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils.** **Soil Science**, New Brunswick, v.56, p.395-404. 1943.

ROBINSON, G. W. New method for the mechanical analysis of soils and other dispersions. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 12, p. 306-321, 1922.

RYŽAK, M.; BIEGANOWSKI, A.; WALCZAK, R. T. Application of laser diffraction method for determination of particle size distribution of grey-brown podzolic soil. **Research Agricultural Engineering**, Czech Republic v. 53, n. 1, p. 34–38, 2007.

SALTER, P. J.; BERRY, G.; WILLIAMS, J. B. Influence of texture on the moisture characteristics of soils. III. Quantitative relationships between particle size, composition, and available-water capacity. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 17, n. 1, p. 93-98, 1966.

SCANLON, B. R.; ANDRASKI, B. J.; BILSKIE, J. Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. In: DANE, J.H; TOPP, C. **Methods of soil analysis.** Madison: **Soil Science Society of America**, 2002. pt. 4. Physical methods, chap. 3, p. 643-970.

SHARMA, M.L.; UEHARA, G. Influence of soilstructure on water relations in Low humic latosols. I. Water retention. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.32. p.765-770. 1968.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S.C. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.32, n.1, p.1-10, 2008.

SILVA, D.; BARROS FILHO, A. F. B.; **Estatística**. USP, São Paulo, 2003. 110p.

SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1487-1494, out. 2002.

REATTO, A.; SILVA, E. M.; BRUAND, A.; MARTINS E.S.; LIMA, J.E.F.W. Validity of the Centrifuge Method for Determining the Water Retention Properties of Tropical Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, USA, v. 72, n. 6, p. 1547-1553, 2008.

SILVA, E.M. **A test of the independent domain theory for predicting moisture hysteretic paths**. 1980, 165p. Tese de Mestrado da Davis University, California, 1980.

SILVA, E.M.; LIMA, J.E.F.W.; AZEVEDO, J.A. & RODRIGUES, L.N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.41, n.2, p.323-330, 2006.

STARR, G.C.; BARAK, P.; LOWERY, B.; AVILA-SEGURA, M. Soil particle concentrations and size analysis using a dielectric method. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 3, p. 858–866, May/June 2000.

STOKES, G.G. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. **Transaction of the Cambridge Philosophical Society**, Cambridge, v. 9, n. 2, p. 8-106, 1851.

SYVITSKI, J.P.M. **Principles, methods, and application of particle size analysis**. New York: Cambridge University Press, 1991. 368 p.

TAN, K.H. **Soil sampling, preparation and analysis**. New York: Marcel Dekker, 1996. 408 p.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.D.C. & DEXTER, A.R. Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the S index. **Scientia Agricola**, Piracicaba 65:56-60, 2008.

TOWNEND, J.; REEVE, M.J. & CARTER, A. Water release characteristic In: SMITH, K.A. **Soil and environmental analysis: Physical methods**. 2.ed. New York, Marcel Dekker Incorporated, 2000. p.95-140.

VAN GENUCHTEN, M. TH.; LIEJ, F.J.; YATES, S.R. **The RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. USDA, US Salinity Laboratory, Document EPA/600/2-91/065, Riverside, CA, USA. 1991.

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

WALTER, N.F.; HALLBERG, G.R.; FENTON, T.S. Particle size analysis by the Iowa State University: soil survey laboratory. In: HALLBERG, G.R. **Standard procedures for evaluation of quaternary materials in Iowa**. Ames: Iowa Geological Survey, 1978. p. 61–74.

WILKINSON, G.E.; KLUTE, A. The temperature effect on the equilibrium energy status of water held by porous media. **Soil Science Society Proceedings**, Madison, v.26, p.326-329. 1962.

WILLMOTT, C.J.,CKLESON, S.G.,DAVIS, R.E. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.