

**COMPARAÇÃO ENTRE AJUSTES DE CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS ARENOSOS EM UMA REGIÃO DE AFLORAMENTO DA FORMAÇÃO BOTUCATU EM SÃO CARLOS – SP**

 <https://doi.org/10.56238/arev6n4-276>

**Data de submissão:** 17/11/2024

**Data de publicação:** 17/12/2024

**Daniel de Lima Nascimento Sírio**

Doutor em Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Professor adjunto I

E-mail: danielsirio@professor.uema.br

Orcid: 0009-0007-9129-2465

Lattes: 6103283444830947

**Karina Suzana Feitosa Pinheiro**

Doutoranda em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

Professora Assistente IV

E-mail: karinapinheiro@professor.uema.br

Orcid: 0000-0002-9915-2295

Lattes: 9144025427932716

**Cláudio José da Silva de Sousa**

Doutor em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

Professor Adjunto II

E-mail: claudiojose@professor.uema.br

Orcid: 0000-0002-1562-679X

Lattes: 7185168778984126

---

**RESUMO**

As Curvas de Retenção de Água no Solo (CRAs) permitem avaliar indiretamente o conteúdo de água, a drenagem interna e a condutividade hidráulica na zona saturada de quase todos os tipos de solos. Diversos autores buscam desenvolver métodos para modelar essas curvas, sendo os modelos propostos por van Genuchten (1980), Fredlund e Xing (1994) e Gitirana e Fredlund (2004) já consolidados. O objetivo do presente trabalho foi escolher qual das CRAs com ajustes bimodais, modeladas pela técnica do Duplo van Genuchten (DVG) propostas por Carducci et al. (2011) e por Gitirana e Fredlund (2004), melhor representavam a umidade real do solo em dois diferentes locais no município de São Carlos, comparado ao ajuste unimodal também realizado. Para tanto, foram instalados dois conjuntos de tensiômetros em solos Residuais da Formação Botucatu Arenosos e foram coletadas amostras indeformadas desses solos e levadas ao laboratório. A determinação das características de retenção dos materiais foi realizada com a utilização da técnica do papel filtro (ASTM, 1992), que permitiu a modelagem de curvas unimodais e bimodais. Foi verificado que os ajustes bimodais obtiveram melhores correlações quadráticas e menores erros médios e menores médias dos erros e o modelo proposto por Carducci et al. (2011) o que apresentou o melhor ajuste entre os dados medidos e calculados.

**Palavras-chave:** Papel Filtro, Tensiômetros, Curvas de Retenção, Modelos Bimodais.

## 1 INTRODUÇÃO

O conceito de infiltração foi introduzido no ciclo hidrológico por Horton (1933), que definiu a capacidade de infiltração potencial como sendo a taxa máxima à qual um dado solo pode absorver a água numa certa condição. A água infiltrada no solo pode ser dividida em três partes: (i) a primeira, atua na zona não saturada ou zona de fluxo não saturado, isto é, na zona onde os vazios do solo estão parcialmente preenchidos por água e ar, acima do nível freático; (ii) a segunda parte, denominada interfluxo (escoamento sub-superficial), a água pode continuar a fluir lateralmente, na zona não saturada, a pequenas profundidades, quando existem níveis pouco permeáveis imediatamente abaixo da superfície do solo e, nessas condições, alcançar os leitos dos cursos d'água; (iii) já na terceira parte a água infiltrada pode percolar até o nível freático, constituindo a recarga ou recursos renováveis dos aquíferos (Feitosa *et al.*, 2008).

Dessa forma, a infiltração de água é a transmissão de água no interior da matriz do solo cujos componentes são ar, água e minerais e matérias do próprio solo. Entender o processo de infiltração e dinâmica da água é considerar corretamente as dimensões dos poros do solo e sua distribuição ao longo da profundidade e como são caracterizadas e distinguidas as interações água-ar-solo e, são essas interações junto à distribuição e tamanho dos poros que darão e determinarão o modo pelo qual a água infiltrada é retida no solo ou escoada no interior do solo (Sírio *et al.*, 2020).

Segundo Hillel (1980), o solo é um material sólido e poroso, que abriga em seus poros, quantidades variáveis de uma solução aquosa de vários eletrólitos e outros componentes, denominada solução do solo e de uma solução gasosa composta praticamente de N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, vapor d'água, CO<sub>2</sub> e pequenas quantidades de outros gases. Comumente presentes na parte sólida ou matriz do solo, estão diversas partículas minerais de diferentes tamanhos e substâncias orgânicas. A quantidade de material orgânico presente no solo, resultante da atividade biológica e cuja produção pode ser intensa ou moderada de matéria orgânica, faz com que a retenção da água no solo seja maior proporcionalmente à sua concentração, de modo que quanto maior a decomposição, perda ou transformação de componentes minerais, mais produtivos biologicamente os solos e consequentemente, mais úmidos (Reichardt, 1996).

Um solo não saturado é aquele cujo espaço poroso está parcialmente cheio de água e parcialmente cheio de ar e o ar só deverá entrar para substituir a água no espaço poroso se parte de seu volume livre e não adsorvido for retirado, resultando numa formação de interfaces ar-água pelos processos de retenção da água pela matriz do solo (ROTH, 2011). Usualmente, a Capacidade de Campo (CC), e o Ponto de Murcha Permanente (PMP) são considerados dentro de limites máximos e mínimos, respectivamente, de água disponível no solo, o primeiro em relação ao grau máximo de

saturação que um solo poderá ter de água e, o segundo, para cada cultura por meio da capacidade de seu sistema radicular conseguir extrair a água do solo (Mendes *et al.* 2022). A partir desses limites, pode-se determinar a capacidade de armazenamento de água disponível em cada classe de solo.

O teor de umidade ( $\theta$ ) representa a água existente no volume total de solo, enquanto o Grau de Saturação ( $Se$ ) representa a água existente no volume de vazios do solo, onde também existe ar. A porosidade  $\eta$  é dada pela relação entre volume de vazios pelo volume total. Já o teor de água é o produto da porosidade pelo grau de saturação, isto é,  $\theta = \eta.Se$ , portanto, teoricamente, na saturação natural do solo ( $Se = 1$ ) o a umidade saturada é igual a saturação,  $\theta_s = \eta$  (Feitosa *et al.*, 2008; Libardi, 1995).

Muitos autores realizam pesquisas com o objetivo de se modelar a capacidade de um solo reter água e, atualmente, existem diversos modelos de ajuste da CRA dos solos e outros tantos métodos para se determinar a relação entre a sucção matricial ( $\psi$ ) e o conteúdo de água de um solo qualquer ( $\theta$ ). Os modelos de ajuste da CRA consolidados são aqueles propostos por van Genuchten (1980), Fredlund e Xing (1994) e Gitirana e Fredlund (2004). No caso do modelo de van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) a CRA é ajustada utilizando-se os parâmetros de umidade de saturação do solo  $\theta_s$ , a umidade residual  $\theta_r$ , os valores da entrada de ar  $\alpha$  nos poros e os parâmetros de ajuste da curva “ $m$ ” e “ $n$ ”. Já para o modelo de Gitirana e Fredlund (2004), podem-se ajustar as CRAs para solos de multiporosidade que apresentam comportamento de curva de retenção bimodais (Carducci *et al.*, 2011), nos quais há um dado intervalo de pressão em que a umidade permanece constante, caracterizados por platôs intermediários da curva. Os parâmetros de ajuste desse modelo de CRA são a saturação efetiva ou grau de saturação do solo  $Se$ , valores de entrada de ar  $\psi_{b1}$  e  $\psi_{b2}$  e parâmetros de ajuste da curva  $d_i$ .

Como em campo, a sucção matricial de um solo em relação à medida direta de sua umidade é simplificada pela utilização de tensiômetros para medir de forma indireta a umidade do solo, deve-se validar o modelo ajustado de CRA e a calibração do papel escolhidos a realidade intrínseca do seu solo para que sejam, a umidade do solo em campo e a umidade via medida indireta por sucção e modelo de CRA, respectivamente, o mais próximo da umidade real do solo e do modelo de curva de retenção de água adotado. A sucção matricial indica a pressão negativa da água em relação à pressão do ar atmosférico (Richards, 1965). No caso do papel filtro em contato, as umidades igualam-se e são convertidas em sucção por calibração para cada tipo de papel. Em contrapartida, nas placas porosas de Richards ou funis de Haines, o conteúdo de água é medido diretamente em relação à pressão aplicada ao solo pela câmara de alta pressão ou pela coluna de água, respectivamente.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para se ajustar a CRA a um modelo, é necessário determinar a sucção matricial de um solo à sua umidade correspondente. Para alcançar esse objetivo, podem-se utilizar panelas de Richards que aplicam uma pressão pré-determinada numa amostra de solo para que ao se realizar a pesagem da amostra, infere-se seu teor de água estabilizado; os funis de Haines também são utilizados na determinação do conteúdo de água onde medem-se diretamente na coluna de água de um tubo capilar a pressão de sucção, nesse caso, a medida também é direta, mas apenas aplicável a pequenas pressões; e, por último usam-se os papéis de filtro previamente calibrados por associações e empresas do ramo de engenharia geológica e do solo e que medem a pressão indiretamente por meio do conteúdo volumétrico de água, em equilíbrio do contato entre o papel filtro e o solo (Sírio *et al.*, 2020).

Na técnica de Papel Filtro, utilizada nesse trabalho, as amostras de solo extraídas em campo devem ser indeformadas, e foram obtidas com o uso de tubos de PVC de parede rígida, nos locais da localização dos 2 conjuntos de tensiômetros que foram instalados em campo com o objetivo de monitorar as variações de umidade no perfil em função da profundidade ao longo do tempo. O primeiro local de instalação foi bem próximo aos limites de municípios de São Carlos e Ibaté numa região de expansão urbana ainda tomada por um pequena plantação de laranjas; o segundo local foi escolhido num haras que tinha por uso do solo superficial a pastagem.

A determinação das características de retenção dos materiais inconsolidados foi realizada com a utilização da técnica do papel filtro, conforme sugerido pela ASTM (1992). Durante as análises relativas ao conjunto de tensiômetros, verificou-se que os ajustes unimodais realizados como proposto por van Genuchten (1980), e até então obtidos, não retratavam as condições de umidade reais em campo. Estas incompatibilidades podem estar relacionadas ou as condições de histerese, ou as características intrínsecas dos solos locais de multiporosidade.

Optou-se, portanto, realizar nova modelagem utilizando de técnicas bimodais de curvas de retenção do solo. Essa nova modelagem foi realizada utilizando os modelos de Gitirana e Fredlund (2004) e o modelo proposto por Carducci *et al.* (2011) para o solo na área do Haras e para o solo na área de Laranja. Ainda na tentativa de superar o problema entre a relação da sucção matricial e umidade do solo do modelo e a medida de sucção marcada no tensiômetro instalado em campo e do teor de água real em campo, foram efetuadas tradagens nos locais de instalação dos tensiômetros com o intuito de determinar a umidade volumétrica real em laboratório, nas localidades onde os tensiômetros estavam instalados, registrando-se também os valores de sucção destes. Para tanto foi realizado um ensaio de simulação de chuvas (Figura 2) para a retirada das amostras no local em 4 diferentes intervalos que são: (i) antes do ensaio da simulação de chuva e leitura tensiométrica; (ii) imediatamente

após a parada da simulação de chuva e leitura tensiométrica; (iii) 2 horas após a parada da simulação de chuvas e leitura tensiométrica; e, (iv) 8 horas após a parada da simulação da chuva e leitura tensiométrica.

## 2.1 MODELAGEM DAS CURVAs DE RETENÇÃO DE ÁGUA (CRAs)

Os modelos que governam a infiltração e a retenção de água nos solos têm sido propostos e estudados na literatura, em áreas como a hidrologia, hidrogeologia, geotecnia, estudos de comportamento e fluxo da água no solo e produção agrícola. Em sua grande maioria, modelos numéricos propostos são empíricos e relacionam a sucção matricial de água no solo e a umidade num ajuste não linear que tem como premissas a distribuição de poros na matriz do solo e o grau de saturação efetiva ( $S_e$ ) para seus ajustes. Suas relações foram progressivamente estudadas desde meados do século IXX, sendo:

$$S_e (\%) = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (1)$$

onde,  $S_e$  é adimensional;  $\theta$  é a umidade relativa do solo em  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $\theta_r$  é a umidade residual em  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $\theta_s$  é a umidade na saturação em  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ .

A equação mais utilizada para determinação de umidade em função da sucção matricial é a de van Genuchten (1980), que foi obtida empiricamente e possui três parâmetros de ajuste das CRAs unimodais, “ $\alpha$ ”, que está relacionada com o tamanho e com a distribuição dos poros no solo e representa a entrada de ar nos poros e “ $m$ ” e “ $n$ ”, que estão relacionados com as inclinações e assíntotas das CRAs (adimensionais), como se segue:

$$S_e = \left(1 + |\alpha\psi|^n\right)^m \quad (2)$$

onde, “ $\alpha$ ” em  $\text{m}^{-1}$ , “ $m$ ” e “ $n$ ” > 0 e  $\psi$  em kpa.

A equação de Van Genuchten apresenta duas assíntotas relacionadas aos conteúdos de água no solo correspondentes à saturação e ao conteúdo residual de água, e um ponto de inflexão entre os platôs, o qual é dependente dos atributos do solo, sendo a sua forma e inclinação reguladas por parâmetros empíricos de ajuste do modelo (Van Genuchten, 1980).

Segundo Mallants (1997), alguns solos de textura e estruturas singulares tem uma necessidade de ajuste bi ou trimodal em seus modelos, dada as diferentes condições próximas da saturação, no

intervalo de umidades médias de succção dos mesoporos, bem como próximo à umidade residual, Conclui pois, que o uso do ajuste uni-modal pode por um lado, superestimar o conteúdo de água perto da umidade residual, e por outro subestimar próximo à saturação e no intervalo de porosidade drenável.

Gitirana e Fredlund (2004) propuseram outro método que relaciona  $\psi$  com  $S_e$  ao invés de  $\theta$  e para ajustes multi-modais para as CRAs sem dependência entre parâmetros de cada influência estrutural e textural dos solos. Segundo os autores, para o caso de ajustes bimodais, é possível descrever quatro hipérboles e que o modelo atende às características de solos argilosos brasileiros (Camapum De Carvalho *et al.* 2002), nos quais, as relações entre os teores de água e pressões de succção devem variar num intervalo de 0 a  $10^6$ kpa e é descrita como:

$$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_{b1} \cdot \psi_{r1}})^{d_1}} + \frac{S_2 - S_3}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_{b2} \cdot \psi_{r1}})^{d_2}} + \frac{S_3 - S_4}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_{b2} \cdot \psi_{r2}})^{d_3}} + S_4 \quad (3)$$

onde,  $\psi_{b1}$  e  $\psi_{b2}>0$  e são valores de entrada de ar nos poros em kpa;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$  são os graus de saturação para as quatro hipérboles em percentagem;  $\psi_{r1}$  e  $\psi_{r2}$  são as pressões nos platôs intermediário e residual, respectivamente em kpa e,  $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$  estão relacionados à curvatura das hipérboles e são chamados pelos autores de fatores de ponderação (adimensionais).

O mais recente ajuste bimodal foi realizado na Equação de van Genuchten (1980) modificada por Carducci *et al.* (2011) e denominada pelos autores como Duplo van Genuchten (DVG), com 40 amostras de solo em com boa aproximação aos dados obtidos, realizados por meio direto em panela de Richards, com correlações quadráticas acima de 0,9. Os autores propuseram que os solos da região de Cerrado brasileiro, têm razão elevada de macro e microporos em relação à sua quantidade de mesoporos e possuem características bimodais de retenção de água no solo. Essa dupla porosidade do solo tem por consequência a dupla permeabilidade desses solos, coexistindo em duas regiões de interação, cujos comportamentos se dão em diferentes intervalos de valores de pressão de succção matricial. A Equação 3 é a equação proposta por Carducci *et al.* (2011).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_p - \theta_r}{[1 + (\alpha_t \psi)^{n_t}]^{m_t}} + \frac{\theta_s - \theta_p}{[1 + (\alpha_e \psi)^{n_e}]^{m_e}} \quad (4)$$

onde,  $\theta_p$  é a umidade no platô assintótico intermediário da curva;  $\alpha_e$  e  $\alpha_t$  correspondem a parâmetros que conferem dupla porosidade, um da estrutura do solo (agregados ou macroporos) e outro, da textura do solo (microporos), respectivamente ( $m^{-1}$ ); “ $m_e$ ”, “ $n_e$ ”, “ $m_t$ ” e “ $n_t$ ” são os parâmetros de ajuste de

curvatura do modelo, os dois primeiros, do platô assintótico de saturação ao intermediário, e os dois últimos, entre o platô intermediário e o residual. Devido às elevadas forças de capilaridade e adsorção da água higroscópica nos microporos, boa parte da água fica retida em seu interior e não se torna disponível ao consumo das plantas (Reichardt, 1996).

O objetivo da pesquisa foi comparar os ajustes bimodais das CRAs, pela técnica do Duplo van Genuchten (DVG) propostas por Carducci *et al.* (2011), e propostas por Gitirana e Fredlund (2004), com o ajuste unimodal proposto por van Genuchten (1980), verificando qual representava melhor a umidade real do solo em dois diferentes locais no município de São Carlos e, conjuntamente, compará-los com dados simultâneos de sucção matricial em campo (via tensiômetros) e umidade do solo (medição direta em laboratório).

## 2.2 COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS

As amostras indeformadas foram extraídas em campo com o uso de tubos de PVC de parede rígida, sendo os locais de extração definidos em função da localização dos 2 conjuntos de tensiômetros que foram instalados em campo com o objetivo de monitorar as variações de umidade no perfil ao longo do tempo. O primeiro local de instalação foi bem próximo aos limites de municípios de São Carlos e Ibaté numa região de expansão urbana ainda tomada por um pequena plantação de laranjas; o segundo local foi escolhido num haras que tinha por uso do solo superficial a pastagem.

A determinação das características de retenção dos materiais inconsolidados foi realizada com a utilização da técnica do papel filtro, conforme sugerido pela ASTM (1992). Durante as análises relativas ao conjunto de tensiômetros, verificou-se que os ajustes unimodais realizados como proposto por van Genuchten (1980), e até então obtidos, não retratavam as condições de umidade reais em campo. Estas incompatibilidades podem estar relacionadas ou as condições de histerese, ou as características intrínsecas dos solos locais de multiporosidade.

Optou-se, portanto, realizar nova modelagem utilizando de técnicas bimodais de curvas de retenção do solo. Essa nova modelagem foi realizada utilizando os modelos de Gitirana e Fredlund (2004) e o modelo proposto por Carducci *et al.* (2011) para o solo na área do Haras e para o solo na área de Laranja. Ainda na tentativa de superar o problema entre a relação da sucção matricial e umidade do solo do modelo e a medida de sucção marcada no tensiômetro instalado em campo e do teor de água real em campo, foram efetuadas tradagens nos locais de instalação dos tensiômetros com o intuito de determinar a umidade volumétrica real em laboratório, nas localidades onde os tensiômetros estavam instalados, registrando-se também os valores de sucção destes. Para tanto foi realizado um ensaio de simulação de chuvas (Figura 2) para a retirada das amostras no local em 4 diferentes

intervalos que são: (i) antes do ensaio da simulação de chuva e leitura tensiométrica; (ii) imediatamente após a parada da simulação de chuva e leitura tensiométrica; (iii) 2 horas após a parada da simulação de chuvas e leitura tensiométrica; e, (iv) 8 horas após a parada da simulação da chuva e leitura tensiométrica.

Assim, os pares de pontos (sucção; umidade volumétrica) reais de campo foram devidamente comparados às umidades e sucções do modelo. Em posse dos pares de leituras e medidas de campo, dos dados do ensaio de papel filtro e dos dois modelos de CRAs avaliou-se qual o mais adequado a representar a real umidade de campo nos locais de instalação dos conjuntos de tensiômetros.

Figura 2 - Simulação de chuva na área do Haras, pluviógrafos e tensiômetros



Fonte: Fagundes, 2010.

### 2.3 ÁREA DE ESTUDO

A área localiza-se na porção central do estado de São Paulo, no Município de São Carlos - SP, ao norte da cidade, sendo uma região do município que oferece condições favoráveis à expansão urbana. A região de coleta de dados está localizada entre as latitudes 7566000 e 7576000m N e as

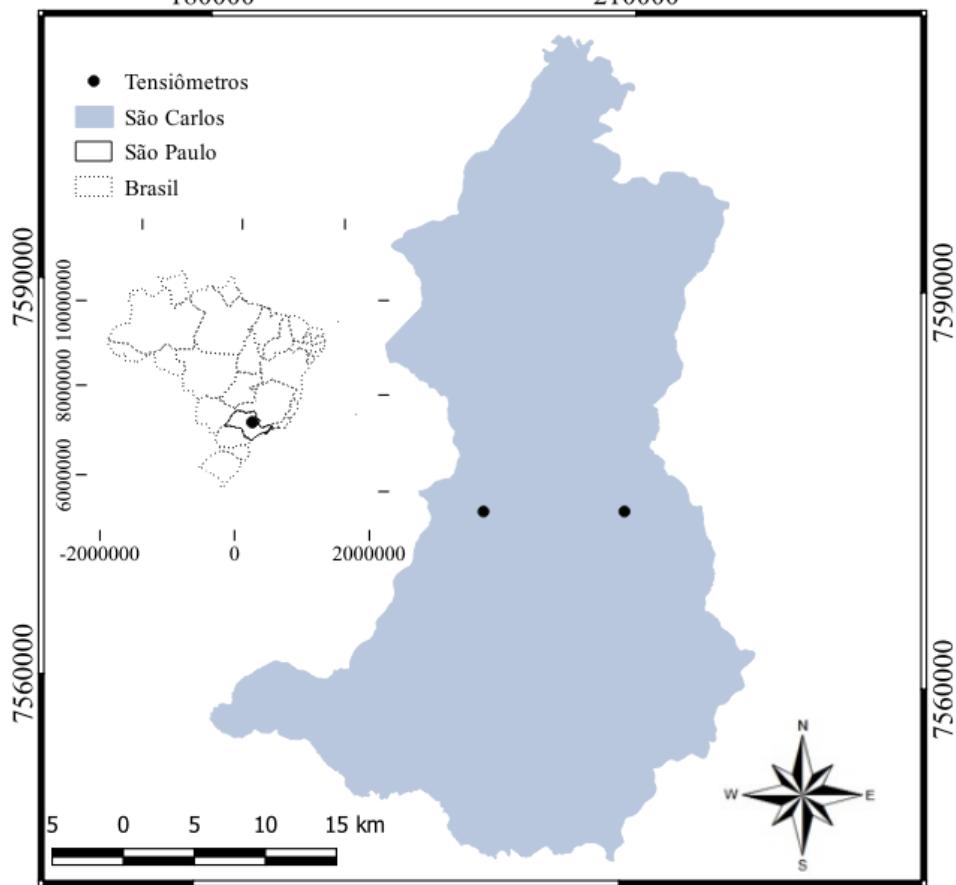
longitudes 190000 e 216000m W, da zona UTM23, onde estão instaladas dezenas de indústrias que utilizam águas subsuperficiais para as suas atividades, além desta ser captada para o consumo humano.

O clima da região é classificado como Cwa-Awa, segundo o sistema de Köppen, indicando que o município apresenta clima subtropical com verão úmido e inverno seco, sendo a precipitação média anual de 1468 mm (Soares, 2003).

Tratando dos aspectos geológicos da área, os pontos de coleta estão localizados sobre o afloramento da formação Botucatu, composta por arenitos friáveis do período triássico. Nestes locais a recarga do aquífero é considerada direta, devido à pouca cimentação do arenito e sua localização em áreas de relevo com baixa declividade (Fagundes, 2010).

Com relação aos materiais inconsolidados, os pontos de coleta estão localizados sobre Residuais da Formação Botucatu Arenosos. Tal material caracteriza-se por apresentar espessuras que podem ultrapassar 10m e é originário da alteração dos arenitos friáveis da Formação Botucatu (Fagundes, 2010). Segundo o mesmo autor, a condutividade hidráulica saturada desse material varia entre  $6,75 \times 10^{-3}$  e  $1,2 \times 10^{-2}$ . Os pontos de coleta estão representados e localizados na Figura 1.

Figura 1 - Localização do município de São Carlos e dos dois conjuntos de tensiômetros



Fonte: Autor.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de caracterização física do material de granulometria e massa específica dos sólidos mostraram porcentagens altas de areia (até 90%) e baixos teores de argila e massas específicas típicas do material da área, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização física básica do material

<b>Residual da Formação Botucatu Arenoso</b>	
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,612 – 2,677
Argila (%)	4 - 12
Silte (%)	1 - 3
Areia (%)	84 - 90

As amostras coletadas antes do ensaio de simulação de chuvas e suas simultâneas leituras tensiométricas foram realizadas dentro da área do ensaio e possibilitou amostrar a umidade de campo. O teor medido de água em campo por sua vez, apresentou valores muito próximos ao limite mínimo da capacidade de campo em ambos os solos como se pode observar nas Tabelas 2 e 5 a seguir, permanecendo suas umidades nos platôs intermediários das curvas ajustadas, tanto para Gitirana e Fredlund (2004), quanto e ainda mais expressivamente, naquelas ajustadas para Carducci *et al.*, (2011).

Na simulação de chuva foram utilizados um total de 2,73 m<sup>3</sup> de água bombeada no simulador para gerar uma chuva de intensidade média de 32,8mm/h durante 2 horas e 44 minutos de simulação. Após essa simulação esperava-se ao menos a saturação dos primeiros 10 cm de profundidade provocado pela frente de molhamento, entretanto, não foi identificada a saturação em nenhuma das amostras coletadas imediatamente após a parada da simulação de chuva em nenhum dos locais, como se observa nas Tabelas 2 e 5. No caso do solo na área do Haras obteve-se apenas 86% da saturação efetiva do solo.

Tabela 2 - Umidade e sucção medidas em campo no ensaio de simulação de chuvas em quatro diferentes intervalos de tempo na área do Haras na data de 05 de agosto de 2008

Haras	Intervalo de medição de campo	Medido			
		$\square$ (%)	Se	mmHg*	kpa
	Antes da simulação de chuva	9,79	0,32	380	49,63
	Imediatamente após a parada da simulação de chuva	23,91	0,86	20	1,66
	2h após a simulação de chuva	14,22	0,49	40	4,33
	8h após a simulação de chuva	10,50	0,35	120	14,99

\*Leitura tensiométrica realizada em mmHg e depois transformada em kpa

Na Tabela 3 são apresentadas as umidades calculadas pelas curvas ajustadas para determinação das umidades por meio da medida de sucção dos tensiômetros na área do Haras e observa-se uma Correlação Quadrática ( $R^2$ ) acima de 0,9 em todas as CRAs. Todavia, o menor  $R^2$  calculado foi aquele

unimodal do ajuste proposto por van Genuchten (1980), seguido pelo ajuste proposto por Gitirana e Fredlund (2004) e Carducci et al., (2011), respectivamente.

Tabela 3 - Umidades calculadas a partir dos modelos de CRAs propostas por Carducci (2010), Gitirana e Fredlund (2004), van Genuchten (1980) e suas correlações quadráticas para área do Haras na data de 08 de maio de 2008

	Calculado		
	Gitirana e Fredlund (2004) - Bimodal	Carducci et al., (2011) - Bimodal	van Genuchten (1980) - Unimodal
Se	□ (%)	□ (%)	□ (%)
Intervalo de medição de campo			
Antes da simulação de chuva	0,34	10,23	7,43
Imediatamente após a simulação	0,84	23,32	23,50
2h após a simulação de chuva	0,50	14,28	15,60
8h após a simulação de chuva	0,36	10,74	10,08
	R <sup>2</sup> = 0,9327	R <sup>2</sup> = 0,9616	R <sup>2</sup> = 0,9293

Na Tabela 4 são apresentados os erros calculados entre os dados medidos de campo e aqueles calculados via CRAs para a área do Haras (umidade por meio de coleta de amostra que foi levada em estufa e sucção medida diretamente nos tensiômetros). Também, na mesma tabela, são apresentados os erros relativos entre os valores calculados entre as CRAs e que são: Erro entre os valores calculados por meio da proposta de van Genuchten (1980) versus Gitirana e Fredlund (2004); van Genuchten (1980) versus Carducci et al., (2011); e, finalmente, entre Gitirana e Fredlund (2004) e Carducci et al., (2011). Logo, tem-se um total de três valores de erros relativos para cada intervalo de tempo e, também, as suas médias para todo intervalo de tempo, ou seja, a média das comparações entre os valores calculados e medidos desde antes da simulação até sua última amostra às 8 horas após o ensaio de simulação.

É importante observar que o ajuste proposto por van Genuchten (1980) tem a maior variação justamente perto dos valores de umidade dentro dos limites de capacidade de campo que são os teores de água mais usuais do solo no ambiente natural. Também se observa que o menor e o maior erro relativo entre a umidade real e as umidades das CRAs ocorreu, respectivamente, entre as CRAs dos autores Carducci et al., (2011) e van Genuchten (1980) para a amostra de umidade do solo obtida antes da simulação de chuva. Já na relação entre CRAs essa diferença ocorreu na comparação entre CRAs de Gitirana e Fredlund (2004) e van Genuchten (1980), na qual esse último autor, apresentou uma diferença de teor de água significativa no solo em torno de 37% menor em relação a Gitirana e Fredlund (2004).

Tabela 4 - Erros médios calculados entre curvas ajustadas e entre os valores de sucção medidos em campo e de umidade medidos em laboratório e média dos erros na data de 05 de agosto de 2008 antes e depois da simulação de chuvas

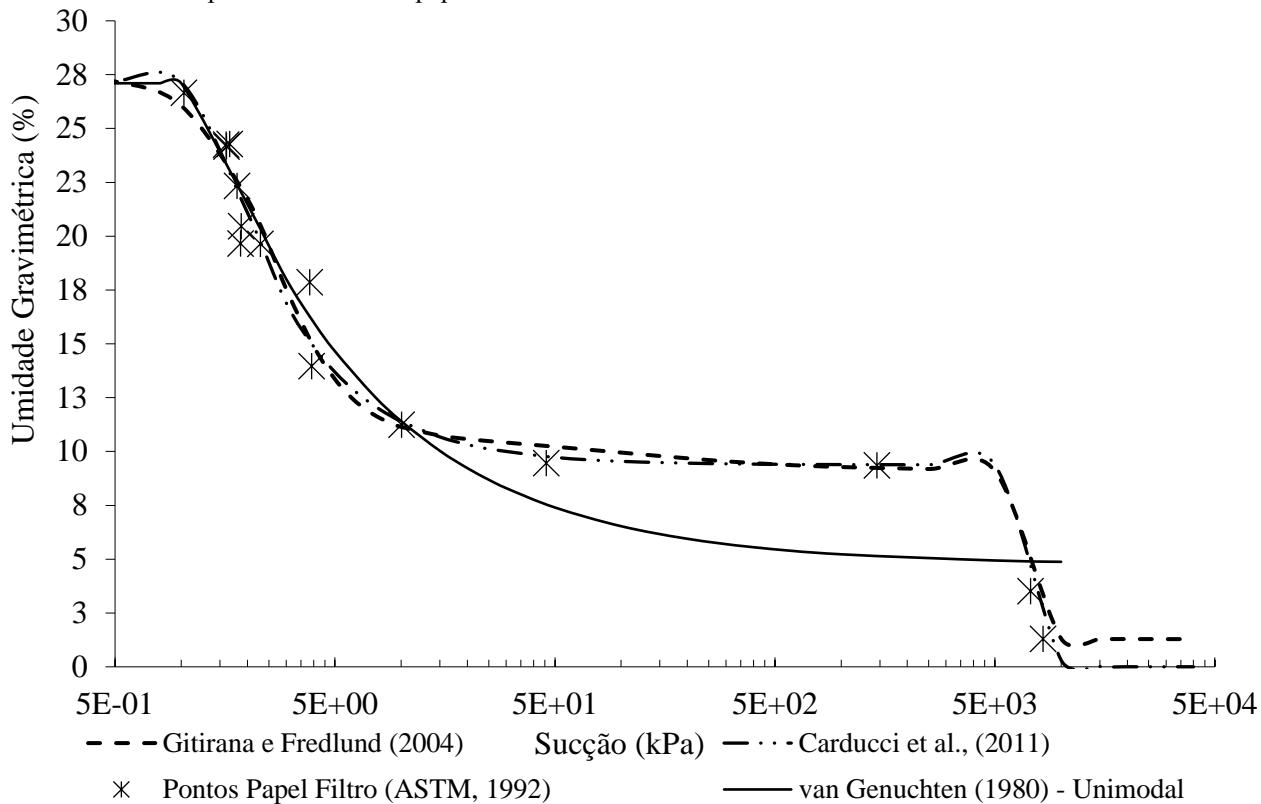
Intervalo de medição de campo	Erro entre calculado e medido		
	Carducci <i>et al.</i> , (2011)	Gitirana e Fredlund (2004)	van Genuchten (1980)
Antes da simulação de chuva %	-0,7	4,2	-31,8
Imediatamente após a simulação %	-1,4	-2,5	-1,7
2h após a simulação de chuva %	1,5	0,6	8,9
8h após a simulação de chuva %	1,6	2,2	-4,2
Média %	0,2	1,1	-7,2

Intervalo de medição de campo	Erro entre curvas calculadas		
	Gitirana e Fredlund, (2004) vs Carducci <i>et al.</i> , (2011)	Gitirana e Fredlund, (2004) vs van Genuchten (1980)	Carducci <i>et al.</i> , (2011) vs van Genuchten (1980)
Antes da simulação de chuva %	-5,1	-37,6	-30,9
Imediatamente após a simulação %	1,0	0,7	-0,3
2h após a simulação de chuva %	0,9	8,4	7,6
8h após a simulação de chuva %	-0,6	-6,6	-5,9
Média %	-0,9	-8,7	-7,4

A Figura 3 representa as três CRAs ajustadas para a área do Haras, ou seja, 2 CRAs bimodais e 1 CRA unimodal. Para a área do Haras percebe-se que os ajustes de Carducci *et al.* (2011) e Gitirana e Fredlund (2004) estão muito próximos um do outro com a exceção da umidade residual e daquela sucção próxima do platô intermediário das CRAs, respectivamente, 27,21% e 27,45% para as umidades de saturação e, entre 10 e 250 kpa para o platô intermediário.

Figura 3 - Curvas de retenção de água no solo ajustadas pelo modelo de Carducci et al., (2011) e Gitirana e Fredlund (2004) para área do Haras e pontos medidos no papel filtro Wachtman 42



Na Tabela 5 estão apresentados os valores de umidade coletados antes, imediatamente após o ensaio e duas vezes após ao término do ensaio de simulação de chuvas (às 2 e 8 horas após o final do ensaio) para a área de plantação de laranjas. Observa-se nesse caso que a saturação efetiva alcançou 94% da saturação do solo imediatamente ao final do ensaio de simulação de chuva.

Tabela 5 - Umidade e sucção medidas em campo no ensaio de simulação de chuvas em quatro diferentes intervalos de tempo na área de plantação de Laranjas na data de 08 de maio de 2008

Laranja	Intervalo de medição de campo	Medido			
		□ (%)	Se	mmHg*	kpa
	Antes da simulação de chuva	12,3	0,52	280	36,31
	Imediatamente após a parada da simulação de chuva	20,1	0,94	10	0,33
	2h após a simulação de chuva	16,2	0,73	40	4,33
	8h após a simulação de chuva	13,2	0,57	100	12,32

\*Leitura tensiométrica realizada em mmHg e depois transformada em kpa

Na Tabela 6, são apresentados os dados de umidade calculados por meio das 3 CRAs (2 bimodais e 1 unimodal) para a área de plantação de laranjas. Semelhante à Tabela 2, a correlação quadrática  $R^2$  das três CRAs ficaram acima de 0,9 e, aquela cujo ajuste foi o proposto por van Genuchten (1980), novamente obteve o menor valor dentre as três CRAs. Entretanto, diferentemente da área do Haras, o  $R^2$  do ajuste proposto por Gitirana e Fredlund (2004) para esse solo, foi o maior

deles apresentando correlação quadrática superior a 98,2%, seguido pela proposta de Carducci *et al.*, (2011) com  $R^2$  igual a 98,1% e, em seguida, pelo ajuste de van Genuchten (1980).

Tabela 6 - Umidades calculadas a partir dos modelos de CRAs propostas por Carducci (2011), Gitirana e Fredlund (2004), van Genuchten (1980) e suas correlações quadráticas para área de Laranjas na data de 08 de maio de 2008

Intervalo de medição de campo	Calculado		
	Gitirana e Fredlund (2004) - Bimodal	Carducci <i>et al.</i> , (2011) - Bimodal	van Genuchten (1980) - Unimodal
Se	$\square$ (%)	$\square$ (%)	$\square$ (%)
Antes da simulação de chuva	0,54	12,63	12,45
Imediatamente após a simulação	1,00	21,26	21,23
2h após a simulação de chuva	0,68	15,36	15,80
8h após a simulação de chuva	0,55	12,97	12,63
$R^2 = 0,9822$		$R^2 = 0,9810$	$R^2 = 0,9475$

Na Tabela 7 estão os erros calculados entre dados de umidade do solo medidos e calculados, a média dos erros desde antes da simulação de chuva até 8 horas após o ensaio de simulação, os erros entre os dados calculados pelas CRAs (semelhante à Tabela 3) e a média dos erros entre os valores obtidos das comparações entre curvas desde antes do início do ensaio de simulação de chuvas até 8 horas subsequentes ao ensaio.

Observa-se que o erro do ajuste proposto por van Genuchten (1980) para a umidade do solo antes do ensaio supera 6,5% e significa uma umidade calculada em relação a real de campo 6,5% menor e novamente para umidades mais comuns no solo natural. Contudo, para os valores próximos a saturação o ajuste proposto por van Genuchten (1980) foi significativamente menor em relação aos ajustes bimodais. O menor erro observado entre as CRAs modeladas e para o solo da área de laranjas foi a umidade daquela amostra coletada antes da simulação de chuvas e a proposta de duplo van Genuchten de Carducci *et al.*, (2011), enquanto o modelo proposto por Gitirana e Fredlund (2004) tiveram grandes variações entre a umidade próxima da saturação e do solo após 2 horas de ensaio com amplitude de 11 pontos percentuais em módulo.

Tabela 7 - Erros médios calculados entre curvas ajustadas e entre os valores de sucção medidos em campo e de umidade medidos em laboratório e média dos erros na data de 08 de maio de 2008 antes e depois da simulação de chuvas para a área de laranjas

Intervalo de medição de campo	Erro entre calculado e medido		
	Carducci et al., (2011)	Gitirana e Fredlund (2004)	Van Genuchten (1980)
Antes da simulação de chuva %	1,2	2,6	-6,5
Imediatamente após a simulação %	5,3	5,5	4,3
2h após a simulação de chuva %	-2,5	-5,5	1,7
8h após a simulação de chuva %	-4,6	-1,8	4,5
Média %	-0,1	0,2	1,0
Erro entre curvas calculadas			
Intervalo de medição de campo	Gitirana e Fredlund, (2004) vs Carducci et al., (2011)	Gitirana e Fredlund, (2004) vs van Genuchten (1980)	Carducci et al., (2011) vs van Genuchten (1980)
Antes da simulação de chuva %	-1,5	-9,4	-7,8
Imediatamente após a simulação %	-0,1	-1,2	-1,1
2h após a simulação de chuva %	2,8	6,8	4,1
8h após a simulação de chuva %	-2,7	6,1	8,6
Média %	-0,4	0,6	1,0

É perceptível também que o valor médio dos erros durante todo intervalo de coleta de amostras é menos sensível nesse solo para o ajuste proposto por Carducci *et al.*, (2011), tanto em módulo quanto erro quadrático em relação aos outros dois ajustes e, portanto, conclui-se que, assim como calculado o erro, já era de se esperar que o maior dos desvios entre as comparações dos ajustes de CRAs, estaria entre van Genuchten (1980) e Carducci *et al.*, (2011).

Na Figura 4 estão representadas as 3 CRAs (1 unimodal e 2 bimodais) que foram ajustadas para o solo da área de laranjas e para esse solo as curvas são bastante distintas entre elas e visualmente percebe-se que o platô intermediário do ajuste proposto por Gitirana e Fredlund (2004) é praticamente inexistente com a queda de umidade em relação ao aumento da pressão de sucção do solo, formado por uma curva suave após o limite de 5 kpa, aproximadamente, até as altas pressões de sucção.

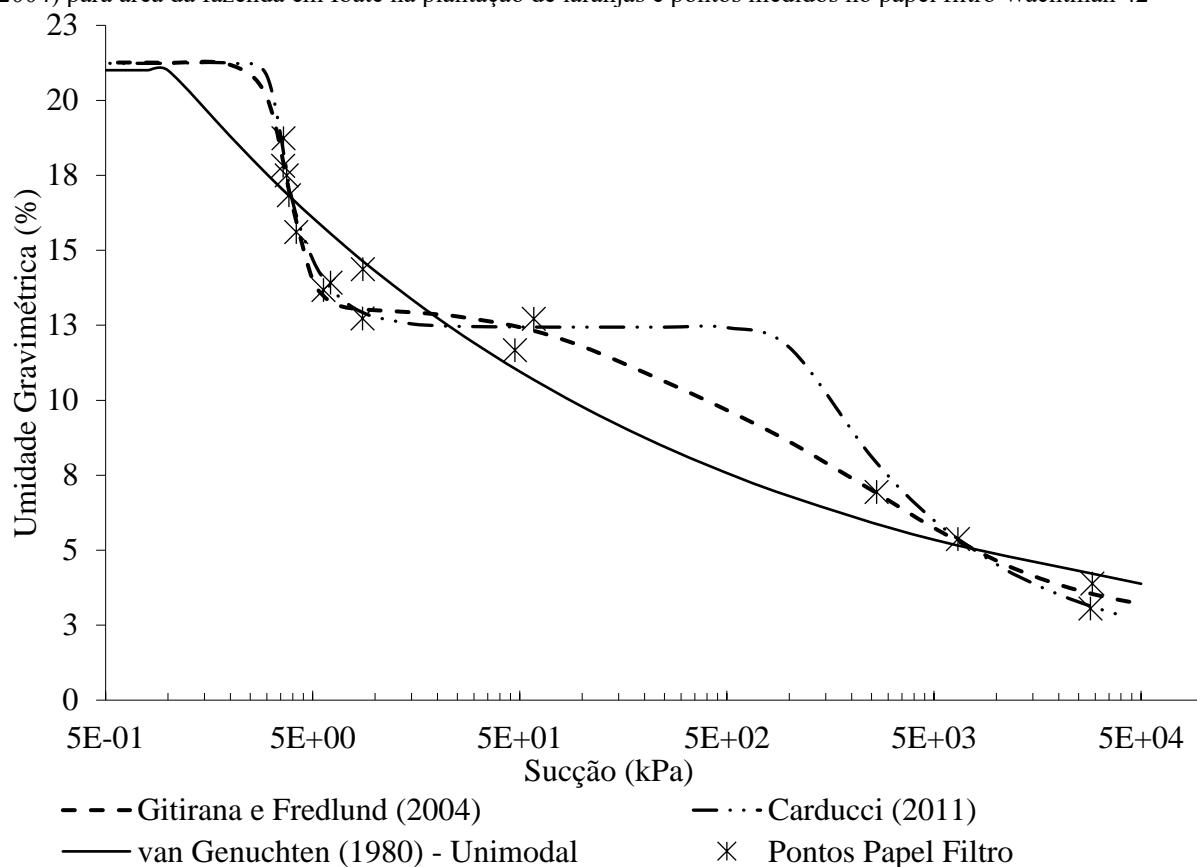
Notadamente, o ajuste proposto por Carducci *et al.* (2011) possui um platô intermediário estável e que mantém a umidade do solo em condições limites e constantes de pressão entre 5 e 1000 kpa, no qual as pressões superiores a essa conseguem retirar a água dos microporos do solo que nem os sistemas radiculares das plantas são capazes.

Nesse ponto, já foi ultrapassado o ponto de murcha permanente da maioria das culturas de médio e grande porte e essa umidade retida no solo já não é mais importante para a agricultura, uma vez que não está disponível para as plantas. Todavia, para projetos de engenharia e geotécnica, os quais

utilizam muitas vezes o teor de água no solo para compactação ótima de solos, por exemplo, essa água tem sim a grande importância.

É provável que a correlação quadrática do ajuste tenha sido maior dentre os calculados por causa dessa suavização entre a umidade limite da capacidade de campo até a umidade residual da curva e, dessa forma, a curva que melhor se ajustou para os tensiômetros instalados nessa área foi aquela proposta por Carducci *et al.*, (2011).

Figura 4 - Curvas de retenção de água no solo ajustadas pelo modelo de Carducci et al., (2011) e Gitirana e Fredlund (2004) para área da fazenda em Ibaté na plantação de laranjas e pontos medidos no papel filtro Wachtman 42



#### 4 CONCLUSÕES

Os ajustes das CRAs bimodais tiveram maiores correlações quadráticas entre os dados obtidos no ensaio de papel filtro dentre os três ajustes realizados. A representação da umidade real de campo também foi maior dentre os ajustes bimodais que apresentaram erros médios e média dos erros menores em relação ao ajuste unimodal para as duas áreas de estudos.

Depois de comparadas os três ajustes, suas correlações quadráticas, erros e a média dos erros entre valores calculados e os medidos para umidade real do solo, tanto para a área do Haras, quanto

para a área de plantação de laranjas, escolheram-se os ajustes propostos por Carducci et al. (2011) denominado como método de Duplo van Genuchten.

## REFERÊNCIAS

ASTM. Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. (D. 5298-92). Annual Book of ASTM Standards, vol. 15.09. 1992.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GUIMARÃES, R. C. AND PEREIRA, J. H. F. Courbes de retention d'eau d'un profil d'alteration. Proc., 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Recife, Brazil, 289–294 (in French). 2002.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. 2011. Modelagem da curva de retenção de água de latossolos utilizando a equação duplo vangenuchten. R. Bras. Ci. Solo, 35:77-86, 2011.

DURNER, W. Predicting the unsaturated hydraulic conductivity using multi-porosity water retention curves. In: M.T. van Genuchten, FT. Leij and L.J. Lund (Editors), Proceedings of the International Workshop, Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. University of California, Riverside, pp. 185-202. 1992.

FAGUNDES, J. R. T. Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos – SP. 2010. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo. São Carlos. 2010.

FEITOSA, F. A. C., FILHO, J. M., FEITOSA, E. C., DEMETRIO, J. G. A. Hidrogeologia: conceitos e aplicações/organização e coordenação científica/Fernando A.C. Feitosa – 3. ed. rev. e ampl. – Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812p.

FREDLUND, D. G. & RAHARDJO, H. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. New York: John Wiley & Sons, Inc.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, [s.l.], v. 31, n. 3, p. 521-532. 1994.

GARDNER, W. R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 20, 151–153. 1956.

GITIRANA JR., G. F. N.; FREDLUND, D. G., Soil-water characteristic curve with in-dependent properties. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, [s.l.], v. 130, n. 2, p. 209-212. 2004.

HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. New York, Academic Press, 1980. 413p.

HORTON, R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. Trans. Am. Geophys. Un., 14, p.446-460, 1933.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba: Editado pelo autor, 1995. 497p.

MALLANTS, D.; MOHANTY, B. P.; VERVOORT, A., and FEYEN, J. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. Soil Technol. 10, 115–132. 1997.

REICHARDT, K. Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas. Piracicaba, SP.: ESALQ/USP., Depto. Física e Meteorologia, 1996. 505p.

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

RICHARDS, L. A.; GARDNER, W. R. and OGATA, G. Physical processes determining water loss from soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 20, 310–314. 1956.

RICHARDS, S. J. Soil suction measurements with tensiometers. In: *Methods of Soil Analysis*, Monograph No. 9, pp. 153–163. Am. Soc. Agron., Madison, WI. 1965.

ROTH, K., 2011. Soil Physics. Lecture Notes. Institute of Environmental Physics, Heidelberg University. 351p.

ŠIMŮNEK, J. D.; JACQUES, J. W.; HOPMANS, M.; INOUE, M.; FLURY AND M. TH. VAN GENUCHTEN. Solute Transport During Variably-Saturated Flow - Inverse Methods, In: *Methods of Soil Analysis*, Part 1, Physical Methods, Chapter 6.6, Eds. J. H. Dane and G. C. Topp, Third edition, SSSA, Madison, WI, 1435-1449, 2002.

SÍRIO, D. L. N. Monitoramento e Modelagem da Recarga Freática em Técnica de Drenagem Compensatória. 124p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, SP. 2014.

SOARES, J. J.; SILVA, D. W. da; LIMA, M. I. S. Current state and projection of the probable original vegetation of the São Carlos region of São Paulo state, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*. 63: p. 527-536. 2003. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1519-69842003000300019](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-69842003000300019)>. Acesso em: jan. 2024.

VAN GENUCHTEN, M. TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898. 1980.

MENDES, K. R.; PORTELA, J. C. ; GONDIM, J. E. F. ; RIBEIRO, M. A. ; MEDEIROS, JOSÉ FRANCISMAR DE ; QUEIROZ, G. C. M. . Physical, chemical and structural attributes of soil in agroecosystems in the Brazilian Semiarid region. *Revista Ciencia Agronomica*, v. 53, p. 2062, 2022.