

Uma Variação do Enunciado de Capacidade de Campo (CC): I) Uso de Funções de Pedotransferência para determinar CC

T.B. OTTONI⁽¹⁾, M.V. OTTONI⁽²⁾, M.B. OLIVEIRA⁽³⁾ & J.R. MACEDO⁽⁴⁾

RESUMO - Capacidade de campo (CC) é um parâmetro largamente aplicado em hidrologia e engenharia. O valor de CC permite a estimativa de volumes de drenagem e disponibilidade de água no solo para plantas, o que explica seu largo uso apesar das reconhecidas imprecisões de sua definição. Nesse artigo é proposta uma outra versão do enunciado de CC, objetivando minimizar as incertezas de seu conceito e determinação, mas ainda mantendo seu significado prático. Nosso enunciado indica que a CC depende da lâmina de infiltração, umidade antecedente, profundidade e propriedades da amostra do solo. Utilizando 22 perfis, mostramos que a CC foi principalmente determinada pelos dados básicos do solo, mas reconhece-se que este resultado não é geral. Tal dependência das propriedades do solo possibilitou que a CC dos 22 perfis fosse apropriadamente determinada por funções de pedotransferência (FPTs) com as mesmas variáveis de entrada usualmente utilizadas no cálculo das curvas de retenção de umidade, como os conteúdos texturais e de matéria orgânica, densidade global e umidade sob uma sucção conhecida (6kPa). A última foi a variável de maior impacto: uma FPT linear nela baseada avaliou a CC com erros médios quadráticos menores que $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na maioria dos solos. Mostrou-se que tal FPT foi um melhor avaliador do que o método tradicional de usar uma umidade sob uma sucção arbitrada.

Introdução

Capacidade de campo (CC) é um parâmetro de solo de grande uso em hidrologia, gestão das terras e engenharia de irrigação/ drenagem. A definição original de Veihmeyer & Hendrickson [1] foi ligeiramente modificada no Glossário de Termos de Ciência do Solo [2], como: “CC é a quantidade de água que permanece no solo 2 ou 3 dias após ter sido molhado e depois da drenagem livre ser desprezível”. Apesar da larga aplicabilidade da CC, seu conceito é criticado por muitos, como citado e justificado por Hillel [3,cap-3] e Cassel & Nielsen [4]. De fato, o que é uma drenagem livre desprezível deve ser melhor enunciado. O molhamento do perfil e a umidade antecedente no solo antes da aplicação hídrica não são descritos com precisão, o que deve ser relevante, também levando em conta a histerese e a redistribuição

de água após a infiltração [5]. Chuva e evapotranspiração nulas também não são citados em [1] e [2]. Uma outra questão é a presença de camadas de impedimento ou muito permeáveis, bem como de níveis freáticos. Assim, todas essas “externalidades devem ser esclarecidas para que a CC possa ser considerada uma variável intrínseca do solo, reproduzível e consistente. O método-padrão de avaliação de CC é baseado no mesmo experimento do método do perfil instantâneo [6] para determinar a função $k(h)$ da condutividade hidráulica não-saturada vertical. Uma parcela quadrada (ou retangular) de solo nu é inundada e, após a infiltração, coberta por um plástico para evitar a evaporação. A distribuição na profundidade da umidade no solo após 2 ou 3 dias define o perfil de CC. Devido às dificuldades operacionais do teste de campo, a CC é comumente considerada como sendo a umidade de amostras indeformadas tomada numa sucção pré-determinada. Cassel & Nielsen [4] citam que uma larga faixa de potenciais de pressão (-50kPa a -2,5kPa) tem sido usada com este propósito, mas as sucções de 5kPa, 10kPa e 33kPa são as escolhas mais comuns; entretanto, não há um critério geral satisfatório para seleção de tais sucções na CC [3,cap.3]

Neste trabalho, uma variação do enunciado clássico de CC será proposta e testada empiricamente. A motivação é de minimizar as incertezas do conceito de CC pela criação de um arcabouço teórico e prático que permita uma avaliação adequada dos processos gêmeos e seriados de infiltração (por alagamento) e drenagem no perfil. Poucos estudos [7,8,9] derivaram funções de pedotransferência simples para estimar a CC determinada pelo método-padrão *in situ*. As variáveis independentes foram as comumente utilizadas em estudos de FPT para retenção de água no solo [10]: conteúdos texturais e de matéria orgânica, densidade global e umidade numa sucção específica. FDTs para CC serão derivadas e testadas neste artigo, também a partir de dados adicionais de CC de solos brasileiros; a principal motivação deste objetivo é de confirmar que em certos perfis a CC pode ser considerada uma propriedade intrínseca do solo

Palavras-Chave: capacidade de campo, função de pedotransferência.

⁽¹⁾ Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 21945-970, Cx. Postal 68570. E-mail: teottoni@poli.ufrj.br.

⁽²⁾ Divisão de Matérias Primas e Minerais – Comissão Nacional de Engenharia Nuclear, R. General Severiano, 90, Rio de Janeiro, RJ, 22290-901.

⁽³⁾ Faculdade Redentor, Av. Zulamith Bittencourt, 22, Itaperuna, RJ, 28300-000.

⁽⁴⁾ Embrapa – Centro Nacional de Pesquisa de Solos, R. Jardim Botânico, 1024, Rio de Janeiro, RJ, 22460-000.

Apoio financeiro: FINEP (CTHidro/GBH-02/2002).

Material e métodos

A. Variação do enunciado de CC

“CC é a distribuição da umidade volumétrica na parte superior do perfil do solo que, através da infiltração vertical, por alagamento raso ($h < 10\text{cm}$ sobre o terreno), de uma lâmina d'água especificada, tornou-se saturada em condições de campo e permaneceu exposta ao processo subsequente de drenagem vertical, sem chuva ou evapotranspiração, por 48h”. Assim, para um dado solo, é assumido que

$$FC(z^*) = FC(\theta_i(z), W) = \theta 48(z^*), z^* < D \quad [1]$$

, onde D é a profundidade da frente de molhamento ao fim da aplicação da lâmina d'água W, e $\theta_i(z)$ e $\theta 48(z)$ são, respectivamente, os perfis de umidade depois de zero e 48h do término da infiltração. O tempo de 48h foi utilizado já que é uma escolha clássica [4], mas também porque o período de drenagem de 2d é frequentemente usado em estudos que inferem danos ao cultivo por motivo de deficiência de aeração no perfil [11, 12], o que permite a utilização de dados de CC como ferramenta para avaliação da capacidade de aeração do solo.

B. Procedimento experimental

A área de estudo é uma bacia hidrográfica de 13km², no município de São José de Ubá (S. J. Ubá), RJ. Bhering *et al.* [13] fizeram o levantamento pedológico da bacia e 13 perfis foram selecionados para nosso trabalho. Em cada solo, dois painéis metálicos quadrados (1,0m x 1,0m x h=0,25m) para os testes de CC foram cravados cerca de 5cm no terreno, separados de 10m. Aproximadamente 350L de água (W=35cm) foi aplicado em seis solos; 300L num solo; 250L em cinco solos; 100L num solo raso. Esses Ws permitiram a saturação dos perfis durante a fase de infiltração, nas profundidades de amostragem. Ao fim da infiltração, as áreas molhadas foram cobertas por plástico e, após 48h, duas amostras indeformadas foram tomadas de sua região central e no meio de cada horizonte pedológico identificado. A média das medidas individuais feitas para esse par de amostras foi o valor atribuído à propriedade do solo, na correspondente profundidade. As amostras foram saturadas por capilaridade antes de serem instaladas em câmaras de pressão para a aplicação de níveis de desorção de 6,0kPa ($\theta(6)$), 33kPa ($\theta(33)$) e 1500kPa($\theta(1500)$). A umidade $\theta(6)$ é arbitrariamente referida como micro (microporosidade). A densidade global (DG) foi obtida pela pesagem das amostras secas. Foram também tomadas amostras deformadas, junto das amostras indeformadas e nas mesmas profundidades. Elas foram usadas na determinação das percentagens de areia, silte e argila (método do densímetro), matéria orgânica (MO), densidade das partículas (DP- método do balão volumétrico). A MO foi medida pelo método de dicromato de potássio com titulação pelo sulfato ferroso, cujo resultado foi multiplicado por 1,724. A porosidade total foi calculada a partir de DG e DP.

Realizou-se um experimento em seis solos envolvendo testes adicionais de CC, a fim de investigar a dependência da CC em relação aos valores da lâmina W. Em cada solo, dois painéis de 1,00m² foram instalados numa configuração triangular, com seus lados afastados entre si em apenas 1,00m, a fim de minimizar efeitos de variabilidade espacial. Uma lâmina distinta (W= 100, 200 ou 300mm) foi aplicada em cada tabuleiro e o teste de CC foi conduzido da forma descrita anteriormente. Em cada solo, CC, DG e θ_i foram determinados nas mesmas profundidades (três ou quatro), nas 3 bacias de inundação.

C. PTF para FC

Foi feita uma análise de correlação e regressão (n= 92 amostras) entre a CC e as variáveis de entrada (areia, silte, argila, micro, $\theta(33)$, $\theta(1500)$, DG e MO). Os erros médios quadráticos (EMQs) e o teste não-paramétrico de Wilcoxon [14,15] foram usados para avaliar os dados observados versus calculados de CC. A análise foi estendida para incluir dados de outros nove perfis de solo, sendo a maioria do Estado do RJ.

Resultados e Discussão

A. Dependência da CC em relação a W

A Fig. 1 mostra os dados de CC e θ_i (n=22) no experimento em que três testes próximos de CC foram conduzidos com lâminas distintas. Como indicado na figura e pelo Teste de Wilcoxon, a CC não foi sensível a W. A dispersão dos dados em torno da linha 1:1 (que é medida pelo EMQ) é devida parcialmente a influências de variabilidade espacial (cujos efeitos principalmente explicam as dispersões para θ_i na Fig. 1). Quando W= 200 ou 300mm, a frente de molhamento da infiltração estava abaixo das profundidades amostradas em todos os perfis.

B. Dependência da CC em relação às propriedades básicas dos solos

Os coeficientes de correlação (r) entre CC e as propriedades dos solos são indicados na Tabela 1 para o experimento de S. J. Ubá (n=92). Informações de [8, 9 e 16] foram agregados aos nossos dados, permitindo que fossem feitas outras estimativas de r (Tabela 1), baseadas numa maior base de dados (n=165). A metodologia de obtenção de CC nesses trabalhos foi análoga à aqui apresentada. A base estendida de dados representa 22 perfis de solos e inclui todas as classes texturais, à exceção das classes siltosas. Ambas as bases apresentam correlações significativas entre CC e as propriedades do solo, com exceção de DG e MO para os dados de S. J. Ubá. As maiores correlações são com os dados de umidade (micro, $\theta(33)$ e $\theta(1500)$), especialmente com a micro, onde $r \approx 0,94$. Isto é um indicativo da grande influência da estrutura do solo em relação a CC, que, neste caso, é maior do que a da granulometria.

C. Determinação da CC a partir de FPTs

A fim de testar a efetividade das FPTs em calcular CC, a maior base de dados (n= 165) é dividida nos três seguintes sub-grupos, cada um composto por solos geograficamente próximos e com similar material de

origem: dados de S. J. Ubá (n=92); dados de Seropédica (n=60) [9,16]; dados de Campos (n=13) [8]. A primeira FPT testada é a equação de regressão entre CC e micro para os dados de S. J. Ubá (Fig. 2a1):

$$CC_c = 0,9178 \text{micro} - 0,01184 \quad [2]$$

O desempenho da Eq. 2 será testado contra o método tradicional, que considera que CC é a umidade para uma sucção conhecida. Assim, na Fig. 2 avaliou-se micro e $\theta(33)$ como estimativas de CC, assim como os valores calculados pela Eq. 2, para os três grupos de dados listados acima. Em todos os casos, CC_c apresenta melhor desempenho que micro e $\theta(33)$. Mesmo para o grupo de amostras usado para validar a Eq. 2 (Seropédica e Campos), os resíduos médios resultantes não são grandes. O maior EMQ (0,0382 m³m⁻³) quando se usa a Eq. 2 é para as amostras de Seropédica, mas sem efeito de previsão tendenciosa (Fig. 2c2). $\theta(33)$ tem melhor desempenho que micro apenas para os solos de S. J. Ubá. Nesse caso, $\theta(33)$ é um estimador não-tendencioso de CC, com EMQ=0,0326 m³m⁻³. Entretanto, ele é um mau estimador para os dados de Seropédica. Micro não tem mau desempenho nas três localidades, mas há uma tendência geral da micro ser maior do que a CC. Assim, de acordo com a análise acima, uma função linear de umidade a uma dada sucção pode ser um melhor estimador da CC do que a alternativa tradicional de escolher o próprio valor da umidade. Tal análise pode ser extrapolada, considerando-se outros modelos de FPT para CC. Foi feito um estudo de regressão multilinear entre os dados de CC e as variáveis da Tabela 1 (n=165). Foram avaliados cinco modelos de FPT (M1 até M5). Seus coeficientes e EMQs são apresentados na Tabela 2. Os erros médios estão na faixa usual de EMQs descrita na literatura para FPTs que calculam umidade do solo [10, 17]. Ocorrem melhores estimativas de CC quando MO e DG se agregam a areia, silte e argila como variáveis de entrada. Quando essas 5 variáveis são consideradas (M3), EMQ é 0,0458m³m⁻³. Quando micro é incluído (M5), há uma melhoria significativa de estimativa da CC. Entretanto, quanto ao modelo M4, cuja única entrada é a micro, seu resíduo médio (0,0281m³m⁻³) é apenas marginalmente maior do que no modelo mais sofisticado (M5), que tem 6 variáveis independentes. Isso sugere que na estimativa de CC a partir de FPT é conveniente que se considere uma variável de umidade como grandeza de entrada

Conclusões

A partir do enunciado proposto de CC, conclui-se que a mesma pode ser uma variável intrínseca do solo em certas umidades pedológicas. Isso foi confirmado pela boa acurácia das estimativas de CC através de FPTs, para os 22 solos. Estudos futuros devem delinear as possíveis limitações desse achado empírico, tornando possível a identificação dos casos, que provavelmente estariam relacionados à estrutura do solo, morfologia ou nível freático, onde a

correspondente distribuição CC(z) não seria fortemente determinada pelas propriedades básicas do solo na profundidade z. Neste estudo, foi provado ser possível calcular CC a partir de FPTs. Seus dados pedológicos de entrada foram aqueles usualmente utilizados na avaliação da retenção de água no solo, mas a umidade volumétrica à tensão de 6kPa foi a variável de maior impacto, comparada às frações texturais, MO e DG. Isso é consistente com o procedimento tradicional de estimar CC pelo valor da umidade a uma sucção escolhida. De fato, uma função linear simples do conteúdo de água a 6kPa determinou CC com erros médios quadráticos menores que 0,04m³m⁻³ na maioria dos solos estudados, tomados individualmente. Essa FPT foi um melhor estimador da CC do que o método que considera a umidade a uma sucção selecionada.

Referências

- [1] VEIHMEYER, F. J. & HENDRICKSON, A. H. 1949. Methods of determining field capacity and wilting percentages of soils. *Soil Sci.* 68: 75-94.
- [2] SSSA. 1984. *Glossary of soil science terms*. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- [3] HILLEL, D. 1980a. *Applications of soil physics*. Academic Press.
- [4] CASSEL, D. K. & NIELSEN, D. R. 1986. Field capacity and available water capacity. p. 901-926. In KLUTE, A., (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1, *Physical and mineralogical methods*. 2nd ed. Madison, Amer. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Agron.
- [5] SI, B. C. & KACHANOSKI, R. G. 2000. Unified solution for infiltration and drainage with hysteresis: Theory and field test. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64(1): 30-36.
- [6] PAIGE, G. B. & HILLEL, D. 1993. Comparison of three methods for assessing soil hydraulic properties. *Soil Sci.* 155(3): 175-189.
- [7] RITCHIE, J. T.; GERAKIS, A. & SULEIMAN, A. 1999. Simple model to estimate field-measured soil water limits. *Trans. ASAE* 42: 1609- 1614.
- [8] THURLER, A. M. 2000. *Determinação de capacidade de campo e retenção de umidade em solos do Terciário da Formação Barreiras, em função de suas características granulométricas e fatores estruturais*. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, UFRJ, Rio de Janeiro.
- [9] MACEDO, J. R.; MENEGUELLI, N. A.; OTTONI FILHO, T. B. & LIMA, J. A. S. 2002. Estimation of field capacity and moisture retention based on regression analysis involving chemical and physical properties in Alfisols and Ultisols of the state of Rio de Janeiro. *Soil Sci. Plant Anal.* 33(13-14):2037-2055.
- [10] PACHEPSKY, Y. A. & RAWLS, W. J. (ed.). 2005. *Development of pedotransfer functions in soil hydrology*. Elsevier. Development in Soil Science, V 30. m Amsterdam.
- [11] HILLEL, D. 1980b. *Fundamentals of soil physics*. Academic Press.
- [12] OCHS, W. J.; WILLARDSON, L. S.; CAMP Jr., C. R.; DONNAN, W. W.; WINGER Jr., R. J. & JOHNSTON, W. R. 1980. Drainage requirements and systems. p. 235-277. In JENSEN, M. E., (ed.) *Design and operation of farm irrigation systems*. St. Joseph, Amer. Soc. Agric. Eng.
- [13] BHERING, S. B.; PEREIRA, N. R.; MACEDO, J. R.; CHAGAS, C. S.; SILVA, E. F.; PRADO, R. B. & NETO, N. C. S. 2005. Caracterização edafambiental das sub-bacias de Cambiocó e Santa Maria no município de São José de Ubá, região noroeste do Estado do Rio de Janeiro para fins de planejamento conservacionistas. *CR-ROM do XXX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, Recife.
- [14] BRADLEY, J. V. 1968. *Distribution-free statistical tests*. Prentice Hall, New Jersey.
- [15] ZAR, H. Z. 1984. *Biostatistical analysis*. 2nd ed. Prentice Hall, New Jersey.
- [16] FABIAN, A. J. & OTTONI FILHO, T. B. 2000. Determinação de capacidade de campo através de testes "in situ" ou de equações de regressão. *Pesq. agropec. bras.* 35(5): 1029-1036.
- [17] SAXTON, K. E. & RAWLS, W. J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1569-1578.

Tabela 1. Coeficientes de correlação entre capacidade de campo e propriedades básicas do solo, a partir de duas bases de dados (n=92 e 165)

	Areia	Silte	Argila	Micro	θ (33)	θ (1500)	OM	DG
n = 92	-0,652**	0,408**	0,481**	0,953**	0,923**	0,891**	0,174	-0,018
n = 165	-0,720**	0,371**	0,628**	0,926**	0,795**†	0,825**†	0,223**	-0,213**

** Correlação significativa a P= 5%, de acordo com o Teste de Pearson.

† Calculada para n=149, já que em [16], onde n=16, não há informação sobre $\theta(33)$ e $\theta(1500)$.

Tabela 2. Coeficientes das funções de pedotransferência multilíneas para capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$), calibrados para a base de dados estendida (n=165). Os modelos são enumerados em ordem decrescente dos erros médios quadráticos (EMQ). As unidades das variáveis de entrada são: $kg kg^{-1}$ (areia, silte, argila, MO); $kg dm^{-3}$ (DG); $m^3 m^{-3}$ (micro).

Modelo	Areia	Silte	Argila	MO	DG	Micro	Constante	EMQ
M1	0,08478	0,4048	0,3792				0,03533	$m^3 m^{-3}$
M2	0,2759	0,6005	0,5729	2,119			-0,1847	0,0481
M3	0,1678	0,5967	0,4977	2,241	0,1190		-0,2877	0,0458
M4						0,8476	0,01181	0,0281
M5	0,03160	0,09379	0,03302	-0,3359	0,05547	0,8638	-0,1156	0,0270

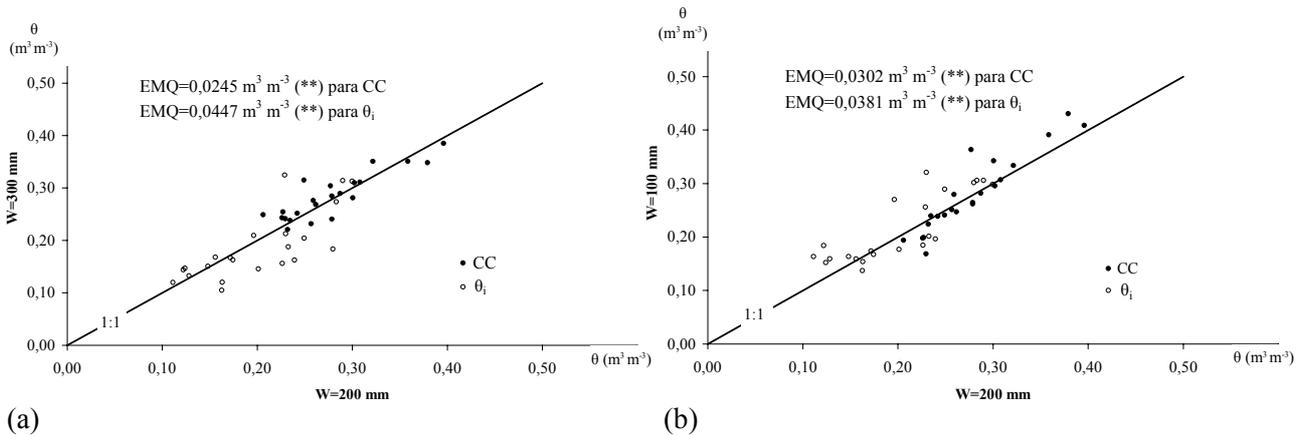
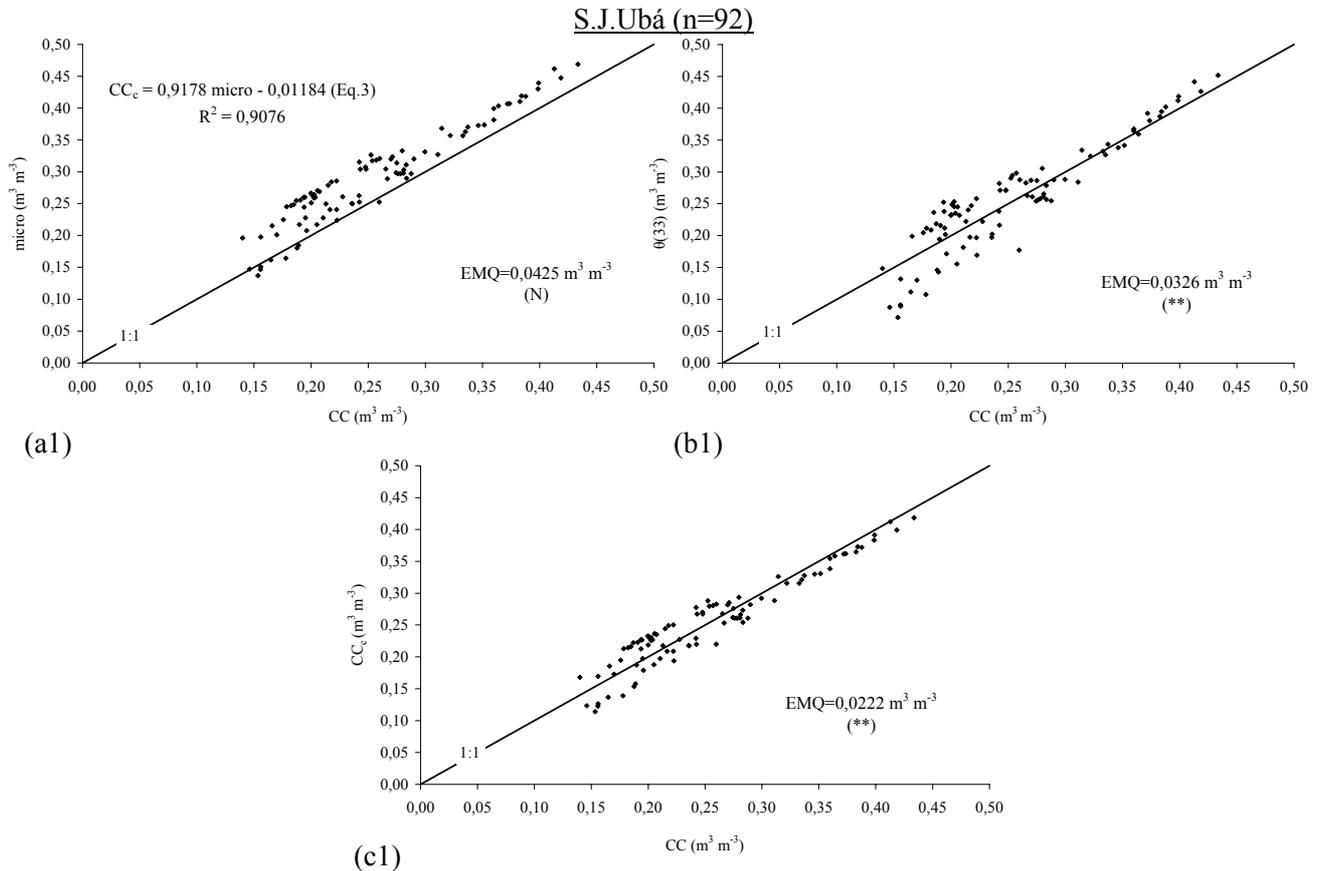
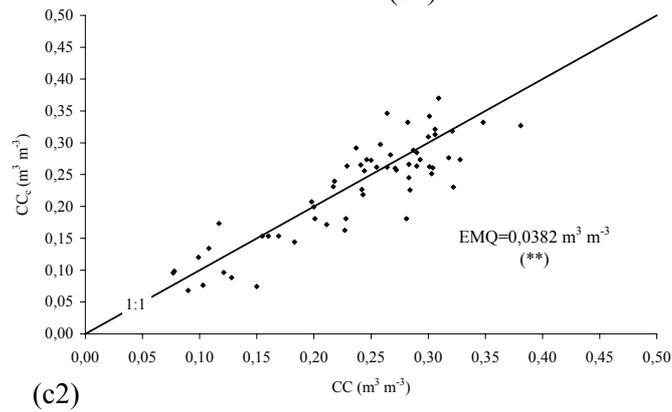
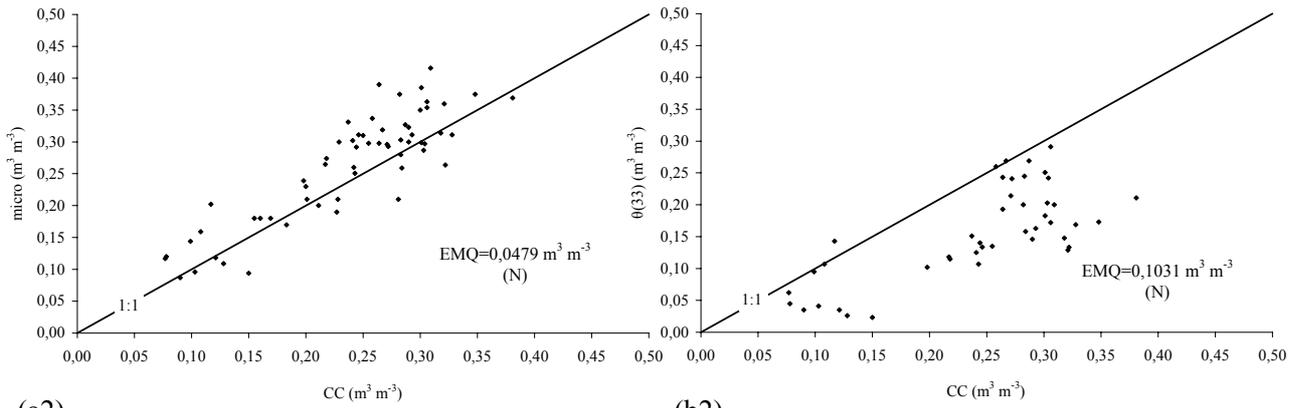


Figura 1. Capacidade de campo (CC) e umidade antecedente (θ_i) no tabuleiro de inundação onde a lâmina d'água aplicada $W= 200mm$, contra: (a) CC e θ_i onde $W= 300mm$; (b) CC e θ_i onde $W= 100mm$. (**) indica que as variáveis são estatisticamente coincidentes (a $P= 5\%$), de acordo com o Teste de Wilconxon ($n=22$).



Seropédica (n=60)



Campos (n=13)

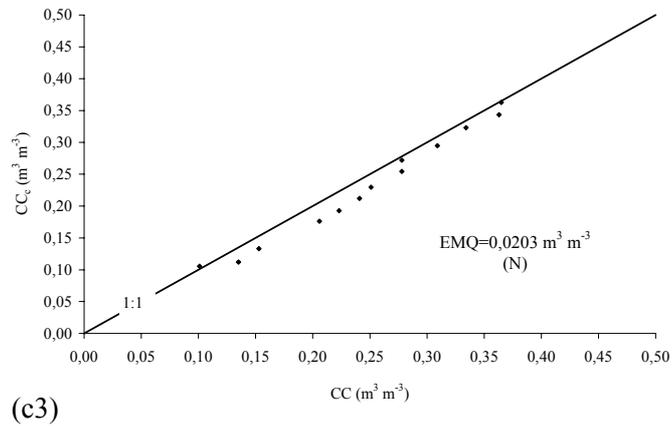
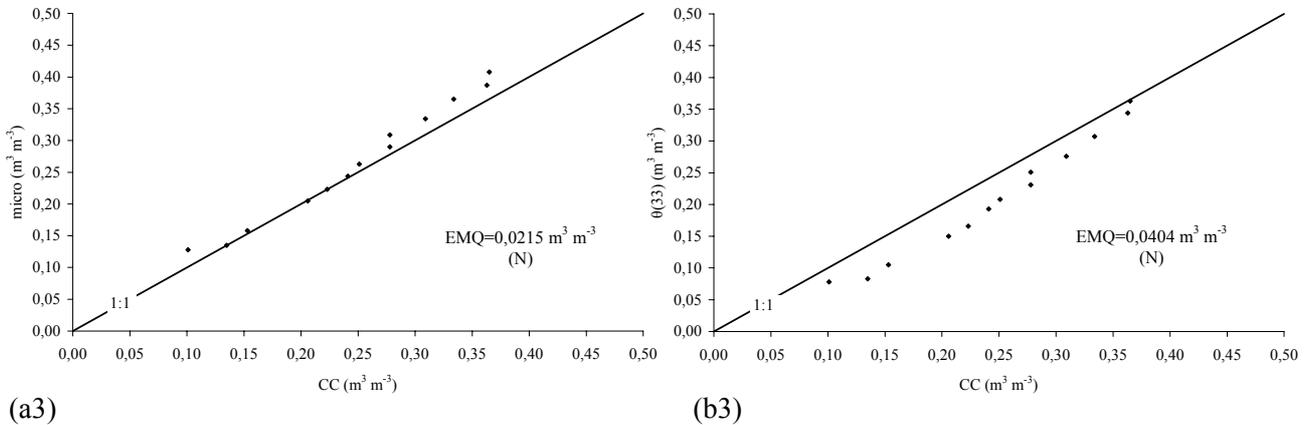


Figura 2. Relações entre capacidade de campo medida (CC) e: (a) micro; (b) $\theta(33)$; (c) $CC_c = 0,9178\text{micro} - 0,01184$, que é a equação de regressão (Eq. 2) para os dados de (a1). (**) e (N) significam que, de acordo com o Teste de Wilconxon, a variável do eixo vertical é (a $P=5\%$) ou não é, respectivamente, estatisticamente coincidente com a CC.