

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE NA CAPACIDADE DE CAMPO E PONTO DE MURCHAMENTO PERMANENTE POR DIFERENTES METODOLOGIAS

Antonio Carlos Saraiva da Costa*, Marcos Rafael Nanni* e Emerson Jeske*

RESUMO. Foram determinados os valores de umidade do solo na capacidade de campo (U_{CC}), ponto de murchamento permanente (U_{PMP}), e água disponível (AD) para três solos do município de Maringá. Os valores de U_{CC} e U_{PMP} dos solos argilosos, Latossolo Roxo (Typic Haplorthox) e Terra Roxa Estruturada (Rhodic Paleudalf), foram maiores que o Latossolo Vermelho-Escuro (Quartzipsammentic Haplorthox) de textura média. A AD do Latossolo Vermelho-Escuro (LE) foi equivalente à Terra Roxa Estruturada (TE) e superior ao Latossolo Roxo (LR). Foi testado o método do tubo para determinação da U_{CC} . O método MT2 (solo saturado sobre solo seco) mostrou ser o mais apropriado, ao passo que o MT1 (solo saturado) superestimou os valores de AD nos diferentes valores de potencial matricial avaliados. O método biológico (MB), utilizando diferentes culturas, resultou em U_{PMP} muito próximos aos determinados no sistema de Richards (SCPR) na pressão de, aproximadamente, 15.000cm de água. Os resultados mostram que U_{CC} , U_{PMP} , e AD podem ser determinados por métodos mais simples (MT 2 e MB), com resultados comparáveis a outras metodologias.

Palavras-chave: capacidade de campo, ponto de murchamento permanente, água disponível.

MOISTURE DETERMINATION AT FIELD CAPACITY AND PERMANENT WILTING POINT BY DIFFERENT METHODOLOGIES

ABSTRACT. This research aimed at determining the values of soil moisture content at field capacity (U_{CC}), of permanent wilting point (U_{PMP}), and of water available (AD) for three types of soil in the municipality of Maringá, state of

* Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5.790, Câmpus Universitário, 87020-900, Maringá-Paraná, Brasil.

Correspondência para Antonio Carlos Saraiva da Costa.

Data de recebimento: 25/06/97.

Data de aceite: 22/08/97.

Paraná, Brazil. The U_{CC} and U_{PMP} values for clay soils, Typic Harplotox and Rhodic Paleudalf were higher than the values for Quartzipsammentic Haplorthox of medium texture. The AD for Quartzipsammentic Haplorthox was equivalent to that for Rhodic Paleudalf but greater than that for Typic Harplotox. Two alternative methods, tube method 1 (saturated soil) and tube method 2 (saturated soil over dry soil) were tested to determine U_{CC} . MT2 presented the best results and simulated well field conditions, but MT1 overrated the U_{CC} and as values for different matricial values. The biological method (BM) using different culture media provided U_{PMP} results very close to the ones determined by Richards system (SCPR) under the pressure of approximately 15,000cm of water. The results showed the U_{CC} , U_{PMP} , and AD may be determined by simples methods (MT2 and MB).

Key words: soil moisture, field capacity, permanent wilting point, water availability.

INTRODUÇÃO

Dentre as características hídricas, que são utilizados em projetos de irrigação e drenagem, experimentos em casa-de-vegetação e na avaliação do efeito do manejo do solo está a quantidade de água disponível do solo (AD) (Millar, 1984; Costa e Coelho, 1989). A AD do solo é definida como sendo a diferença entre o teor de água no limite superior de umidade ou capacidade de campo (U_{CC}) e o teor de água no limite inferior de umidade ou ponto de murchamento permanente (U_{PMP}) (Reichardt, 1985). Este parâmetro é afetado pelas características do solo, como o teor de matéria orgânica, microporosidade, percentagem e tipos de minerais encontrados na fração argila (Elrick e Tanner, 1955; Salter e Williams, 1965; Obi, 1974; Kumar *et al.*, 1985).

A determinação do teor de água na U_{CC} e no U_{PMP} pode ser efetuada utilizando-se diferentes metodologias. O teor de água na U_{CC} pode ser determinado a campo pelo método do perfil instantâneo (Costa *et al.*, 1989). Em condições de laboratório a U_{CC} pode ser determinada utilizando-se funis de Büchner (FB), a mesa de tensão, e o sistema de câmara de pressão de Richards (SCPR). Nestes equipamentos, uma amostra de solo, previamente saturada, é colocada sob uma tensão de água ou pressão de ar, até que atinja o equilíbrio, sendo em seguida determinada sua umidade gravimetricamente. A determinação da U_{CC} pode ser ainda efetuada por métodos alternativos, como o método do tubo (MT) (Fernandes *et al.*, 1978), que necessitam ser melhor avaliados em diferentes solos e condições. A tensão ou pressão a que são

submetidas as amostras de solo na determinação da U_{CC} é um assunto em debate na literatura. Autores utilizam valores que variam de 60, 100, à 330cm de água (Reichardt, 1985). Solos tropicais, onde há maior quantidade de macroporos, a U_{CC} tem sido determinada entre tensões de -60 e -100cm de água (Wolf, 1975; Uehara e Gilman, 1981), enquanto para solos de clima temperado, o valor de 330cm de água é considerado padrão (Haise *et al.*, 1955). Jamison (1956), citado por Obi (1974), obteve dados indicando que a U_{CC} está relacionada com uma tensão de -330cm de água. Vários trabalhos utilizando solos tropicais têm demonstrado que a U_{CC} corresponde a tensões que variam de -60 a -100cm de água (Pereira, 1957; Oliveira e Queiroz, 1975; Lal, 1979).

O teor de água na U_{PMP} foi originalmente determinado pelo Método Biológico. O MB, desenvolvido inicialmente por Briggs e Shantz (1912, 1914), utiliza o girassol como planta indicadora em um solo de textura média. Este método é considerado um padrão internacional e tem sido reproduzido para outros solos e culturas (Embrapa, 1979). O MB, no entanto, atualmente não é utilizado em análise de rotina para determinação da U_{PMP} . Este método foi substituído pelo Sistema de Câmara de Pressão de Richards (SCPR), onde, num mesmo equipamento, é possível determinar simultaneamente a U_{PMP} de várias amostras, aplicando-se uma pressão de ar equivalente a 15.000cm de água. Atualmente, esta determinação tem sido considerada um sistema-padrão para determinação da U_{PMP} , mas possui a ressalva de ser um equipamento importado, caro, e onde cada determinação de umidade pode levar vários dias (Haise *et al.*, 1955; Embrapa, 1979; Kiehl, 1979). Obi (1974) determinou a U_{PMP} utilizando o SCPR como padrão e as plantas de girassol e “Okra” pelo método biológico, e observou que as plantas absorviam água numa tensão próxima a -15.000cm de água, evidenciando que para os solos estudados, estas culturas entraram em murcha em tensões maiores que -15.000cm de água. Fernandes *et al.* (1978) determinaram a U_{PMP} pelo MB para as culturas de soja, milho e feijão em diferentes solos de Minas Gerais. Para o milho, a U_{PMP} variou de 5.000 a mais de -15.000cm de água; o feijão e a soja atingiram a U_{PMP} em tensões sempre maiores que -15.000cm de água. Calculando a AD dos solos, os autores observaram que o valor quase não se alterava, quando se utilizavam no cálculo, as tensões de -1/10 e -3 bares. Embora o potencial matricial (Ψ_m) para determinar a U_{PMP} seja -15.000cm de água, o estresse hídrico pode prejudicar a produtividade das culturas em tensões

bem maiores (Millar, 1984). Haise *et al.* (1955) determinaram que para o trigo no estágio de maturação do grão, o limite inferior de disponibilidade de água está em torno de -25.000cm de água.

Trabalhos de Sharma e Uehara (1968), no Havaí, e Wolf (1975) em solos de Porto Rico, mostraram que há muito pouca diferença entre a umidade na tensão de -1.000 e -15.000cm de água. Wolf (1975), utilizando dados de oxisolos e ultisolos, recomendou que a AD devesse ser estimada entre as tensões de -100 e -15.000cm de água e observou que a quantidade de água retida entre as tensões de -1.000 e -15.000cm de água é menos aproveitável pelas culturas do que a retida entre as tensões de -100 e -1.000cm de água. A U_{PMP} do solo possui uma relação muito estreita com o teor de argila, já que numa tensão tão baixa a água fica retida pelas cargas espalhadas pela superfície dos minerais (van Wambeke, 1974, Arruda *et al.*, 1987). Solos tropicais argilosos com baixa densidade de carga superficial, argila de baixa atividade, apresentam um alto grau de agregação o que determina que a retenção da água seja pequena e muito similar a solos arenosos (Uehara e Gillman, 1981). O objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes metodologias para determinação da U_{CC} , U_{PMP} e a quantidade de AD em solos do município de Maringá, comparando os resultados com métodos tradicionais utilizados na sua determinação.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização química e física dos solos

Neste estudo, foram utilizados solos das classes Latossolo Roxo (LR), Terra Roxa Estruturada (TE), e o Latossolo Vermelho Escuro (LE) textura média. De acordo com Embrapa (1984) estes solos são classificados pelo sistema americano (Estados Unidos, 1975) respectivamente como *Typic Haplorthox*, *Rhodic Paleudalf* e *Quartzipsammentic Haplorthox*. Os solos foram amostrados no município de Maringá em áreas representativas destas classes de solos. Para avaliação das características químicas, físicas e hídricas dos solos, foi efetuada a amostragem da camada de 0-20cm com estrutura deformada, em sacos de estopa de 60kg, e natural em cilindros de Kopeck de 50cm³, todos em triplicata. As amostras de solo de estrutura deformada foram enviadas ao laboratório de solos da Universidade

Estadual de Maringá, permitido secar ao ar, esboroadas mecanicamente até passar 100% em peneira 2 mm, e separadas para análise (Embrapa, 1979). O pH do solo foi determinado em uma solução 0.01 M de CaCl_2 , numa relação solo: solução de 1:2,5. Cálcio, magnésio e alumínio trocáveis foram extraídos com uma solução tampão de 1 M KCl. A acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$) foi extraída com acetato de cálcio 1N a pH 7,0. A disponibilidade de potássio foi determinada por extração com uma solução de HCl 0,05 M e H_2SO_4 0,0025 M (Embrapa, 1979). O carbono orgânico foi determinado segundo o método de Walkley (1947). Os resultados das análises químicas foram utilizados para a determinação da soma de bases ou valor S.

$$S (\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}) = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ \quad (1)$$

A capacidade de troca catiônica (T) foi calculada a partir da seguinte fórmula:

$$T (\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}) = S + \text{Acidez Potencial} \quad (2)$$

A saturação de bases (V) foi calculada a partir de:

$$V (\%) = (S \cdot T^{-1}) \cdot 100 \quad (3)$$

A determinação da composição granulométrica dos solos foi feita pelo método da pipeta. (Kiehl, 1979). A determinação da densidade global do solo (D_g) foi efetuada pelo método do anel volumétrico de Kopeck de 50cm^3 . A amostra de estrutura natural tirada a campo foi colocada em estufa (105°C) até peso constante (PS).

$$D_g (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}) = (\text{PS} / 50) \quad (4)$$

O método utilizado para a determinação da densidade das partículas (D_p) foi o do picnômetro com álcool (Kiehl, 1979). O volume das partículas foi considerado a diferença entre o volume do picnômetro (V_p) e o volume do álcool (V_a) adicionado.

$$D_p (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}) = [\text{PS} \cdot (V_p - V_a)^{-1}] \quad (5)$$

A porosidade total (P) foi calculada, indiretamente, utilizando-se a densidade global (D_g) e a densidade de partículas (D_p):

$$P (\%) = [1 - (D_g \cdot D_p^{-1})] \cdot 100 \quad (6)$$

Os valores de umidade gravimétrica (U) nos diferentes valores de potencial matricial (Ψ_m) necessários à elaboração da curva característica de retenção de água foram determinados nas amostras de estrutura natural, por secamento (Reichardt, 1985). As tensões aplicadas foram de

-1, -10, - 60cm de água no Funil de Büchner (FB). As pressões de ar equivalentes a 100, 330, 1.000, e 15.000cm de água foram aplicadas utilizando-se o SCPR. A umidade gravimétrica em cada tensão/pressão foi determinada pesando-se a amostra úmida após o equilíbrio (PU), colocando-a, após, numa estufa a 105°C até peso constante (PS).

$$U \text{ (g . g}^{-1}\text{)} = [(PU - PS) / (PS - T)] \quad (7)$$

onde T = tara do cilindro (g).

A porosidade total do solo (P) pode ser dividida em poros capilares ou microporos e macroporos. A macroporosidade (Ma) foi determinada considerando-se a diferença entre o volume de água retida na saturação e aquela retida na tensão de -60cm de água (U_{60}). A microporosidade (Mi) foi determinada por diferença entre a macroporosidade e a porosidade total. Considerando que macroporos e microporos formam 100% dos poros do solo, temos:

$$Mi + Ma = 100\% \quad (8)$$

A macroporosidade (Ma) foi calculada pela seguinte fórmula:

$$Ma \text{ (\%)} = \{ [P - (U_{60} \cdot Dg \cdot 100)] / P \} \cdot 100 \quad (9)$$

Umidade do Solo na Capacidade de Campo (U_{CC}) - Método do Tubo (MT)

Além da determinação da U_{CC} utilizando o SCPR, foi também determinada pelo Método do Tubo (MT). Foram considerados dois tipos de determinação por este método. Em ambas as determinações foram utilizados cilindros de PVC de 500cm³, com uma tela de nailón colada na parte inferior, onde o solo seco e peneirado foi adicionado e levemente compactado de forma a simular os valores de densidade global determinados a campo. O primeiro método do tubo (MT 1) simula a determinação desta característica em condições de um vaso. O cilindro contendo o solo foi colocado para saturar por 24 horas. Após a saturação, o cilindro foi retirado, recoberto com uma folha de alumínio para evitar evaporação, e foi permitido drenar numa superfície livre, até que a água que ocupava os macroporos (Reichardt, 1985) drenava, até cessar. O segundo método do tubo (MT 2) simula a determinação da U_{CC} em condições de campo. Neste procedimento, foram utilizados dois cilindros de PVC. O primeiro foi acondicionado como no MT 1 e colocado para saturar por 24 horas. Após a saturação, este foi colocado para drenar sobre um outro cilindro contendo o mesmo solo seco, ao ar. Em seguida à

montagem do conjunto de cilindros, o sistema foi recoberto com uma folha de alumínio para evitar a evaporação, e permitida a drenagem do excesso de água. Foram feitas amostragens de solo a 0, 24, 48, e 72 horas após o início do processo de drenagem nos dois procedimentos (MT 1 e MT 2). Os valores de umidade gravimétrica (U) obtidos nos dois procedimentos foram transformados em valores de potencial matricial (Ψ_m), a partir dos dados da curva característica de umidade dos solos, descrita anteriormente, ajustados a uma modificação do modelo matemático não linear proposto por van Genuchten (1978).

$$U = U_r + ((U_s - U_r) / ((1 + (\alpha \cdot \Psi_m))^n)^m) \quad (10)$$

onde U_r , U_s , α , n , m , são parâmetros determinados no processo de regressão não linear.

Umidade no Ponto de Murchamento Permanente (U_{PMP}) - Método Biológico (MB)

A U_{PMP} foi determinada por dessecamento de amostras naturais previamente saturadas, no SCPR, aplicando-se uma pressão de ar equivalente a 15.000cm de água, e pelo MB (Embrapa, 1979). No MB foram utilizados tubos de PVC de 500cm³ com a base perfurada, onde foram adicionados 500g de solo previamente corrigidos com calcário, e adubados com macro e micronutrientes. O solo recebeu água correspondente a 1/2 do volume poroso, e permitido descansar por uma semana. Por este método, a cultura utilizada como indicadora é o girassol (*Helianthus annuus*, L.). Além desta, foram utilizadas outras de importância econômica para o Estado do Paraná como: arroz (*Oriza sativa*, L.), feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.), milho (*Zea mays*, L.), soja (*Glycine max*, (L.) Merr.), sorgo (*Sorghum vulgare*, Pers.), e trigo (*Triticum aestivum*, L.). Em cada vaso foram plantadas 6 sementes, e após a emergência efetuou-se o desbaste permanecendo 2 plantas por vaso, resultando numa relação de 1 planta para cada 250 g de solo (Embrapa, 1979). As culturas foram irrigadas diariamente até o aparecimento do terceiro par de folhas verdadeiras, quando então o fornecimento de água foi suspenso. Com o secamento do solo, as plantas entraram em processo de murchamento. Nesta fase, foram então colocadas numa câmara úmida, com temperatura em torno de 30°C e umidade relativa de 100%, para recobrar a turgidez. Quando, mesmo nesta condição, permaneciam murchas, assumiu-se que haviam atingido a

U_{PMP} . Neste estágio os vasos foram retirados, desmontados, e foram retiradas três amostras de solo de cada vaso para determinação da umidade pelo método gravimétrico.

Determinação da Água Disponível (AD)

A quantidade de água disponível (AD) foi calculada a partir da equação:

$$AD \text{ (mm água} \cdot \text{m}^{-1} \text{ de solo)} = [Dg \cdot (U_{CC} - U_{PMP}) \cdot 1.000] \quad (11)$$

Os valores de AD calculados a partir dos valores de U_{CC} e U_{PMP} determinados pelo SCPR foram considerados como padrão e comparados com os valores de U_{CC} e U_{PMP} obtidos pelos métodos alternativos, i.é, o método biológico e o método do tubo (MT 1 e MT 2). Foram calculados diferentes valores de AD variando segundo os valores de U_{CC} . Estes foram determinados nas tensões de -60, -100, e -330cm de água determinados no SCPR e pelos valores de umidade gravimétrica determinados após 24, 48, e 72 horas de drenagem pelos métodos MT 1 e MT 2.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características químicas e físicas dos solos

A TE é um solo menos intemperizado e portanto mais fértil, quando comparado com o LR e o LE (Costa, 1996). Este solo apresentou os maiores valores de pH, carbono, soma das bases, capacidade de troca catiônica e saturação de bases (Tabela 1). O LE por ser um solo derivado de uma rocha sedimentar arenosa, Arenito Caiuá, apresentou os menores valores de pH, Valor S, CTC, V%, e teor de fósforo (Embrapa, 1984).

Tabela 1. Características químicas do Latossolo Roxo (LR), Terra Roxa Estruturada (TE) e Latossolo Vermelho-Escuro (LE). Valores são média de quatro repetições.

Solo	pH CaCl ₂	C %	Ca+Mg <-----cmol _c kg ⁻¹ ----->	K	H+Al	S	T	V %	P ppm
LR	5.2	1.25	5.41	0.37	3.39	5.78	9.17	63	8
TE	5.8	1.71	9.41	0.77	2.54	10.18	12.72	80	6
LE	4.0	0.45	2.08	0.18	3.69	2.26	5.95	38	1

A análise granulométrica do LR e da TE resultou em solos argilosos (TE) a muito argilosos (LR); sendo que o TE, por ser o solo menos intemperizado, apresentou uma maior porcentagem de silte. O LE possui uma textura franco-arenosa, característico dos solos derivados do Arenito Caiuá (Embrapa, 1984; Costa e Coelho, 1989). A presença de uma estrutura granular, muito pequena, forte no LR determinou o menor valor de densidade global, já a TE possui agregados na forma de blocos adensados determinando maiores valores de densidade global (Costa *et al.*, 1989). O LE, por ser um solo muito mais arenoso, possuiu os maiores valores de densidade global (Kiehl, 1979). Os solos argilosos, devido à baixa densidade global e elevada densidade das partículas (devido à presença de óxidos e hidróxidos de ferro) apresentaram uma porosidade total ao redor de 60%. São, portanto, solos muito porosos onde predominam microporos. O LE devido à maior densidade global e menor densidade das partículas (presença predominante de quartzo), apresentou um menor valor de porosidade total (49%) onde, ao contrário dos solos argilosos, predominam macroporos em relação aos microporos (Kiehl, 1979).

Tabela 2. Teores de areia, silte e argila, densidade global (Dg), densidade das partículas (Dp), porosidade total (P), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) dos diferentes solos. Valores são média de três repetições.

Solo	Areia <-----%----->	Silte <-----%----->	Argila <-----%----->	Dg <----- gcm ⁻³ ----->	Dp <----- gcm ⁻³ ----->	P <-----%----->	Ma <-----%----->	Mi <-----%----->
LR	20	12	68	1,11	3,14	65	44	56
TE	18	33	49	1,24	3,23	61	43	57
LE	72	3	25	1,47	2,86	49	57	43

Umidade do solo na capacidade de campo (U_{CC})

Os valores de U_{CC} para os solos argilosos (TE e LR), determinados no SCPR, variaram menos entre as tensões de -60 e -100cm de água comparados às tensões de -100 ou -330cm de água (Tabela 3). A TE tendeu à apresentar valores um pouco maiores de U_{CC} que o LR porque apresenta uma maior porcentagem de minerais expansíveis (montmorilonita, vermiculita) e um maior teor de matéria orgânica (Kumar *et al.*, 1985; Costa *et al.*, 1989). Na tensão de -100cm de água o LE apresentou valor de U_{CC} cerca da metade dos solos argilosos, e ainda menor valor na tensão de -330cm de água (Tabela 3), evidenciando uma

maior proporção de macroporos e baixo conteúdo de argila que resultam em maior perda de água em tensões maiores que -1.000cm (Tabela 2) (Salter e Williams, 1965; van Wambeke, 1974; Wolf, 1975; Sanches, 1981; Costa e Coelho, 1989).

A U_{CC} determinada pelo método do tubo (MT 1), independente do tempo de drenagem, apresentou valores sempre muito maiores que os valores determinados pelo SCPR (Tabela 4) na tensão de -100cm de H_2O . Esta superestimativa dos valores de umidade gravimétrica na U_{CC} são devido à presença de um gradiente de potencial total unitário ($\delta\Psi_t \cdot \delta z^{-1} = 1$) no MT 1, na interface da base do cilindro com a atmosfera (Reichardt, 1985). A única força que determina a perda de água do cilindro é a componente do potencial gravitacional (Ψ_g) (Reichardt, 1985).

Tabela 3. Valores de umidade gravimétrica ($U = g \cdot g^{-1}$) para os diferentes valores de potencial matricial (Ψ_m) dos diferentes solos determinados pelo Funil de Büchner (FB) e o Sistema de Câmara de Pressão de Richards (SCPR). Valores são média de três repetições.

Solo	Ψ_m (cm H_2O)						
	<----- FB ----->			<----- SCPR ----->			
	-1	-10	-60	-100	-330	-1.000	-15.000
LR	0,6134	0,5462	0,3649	0,3216	0,2715	0,2425	0,2144
TE	0,5900	0,5557	0,3515	0,3229	0,2777	0,2397	0,2030
LE	0,4053	0,3624	0,2073	0,1677	0,1247	0,0989	0,0771

Os altos valores de U_{CC} observados no MT 1, correspondem a valores de potencial matricial (Ψ_m) maiores que uma tensão de -20cm de água, mesmo após 72 horas de drenagem livre, independente da classe de solo (Tabela 4). Estes resultados demonstram que o MT 1 é, portanto, um método inadequado para determinar a U_{CC} , por superestimar este valor, determinando um excesso de água no solo que pode acarretar condições redutoras prejudiciais à atividade biológica das raízes e microorganismos (Slatyer, 1957; Reichardt, 1985).

A simulação das condições de campo, anexando-se um tubo de solo seco na base do tubo saturado (MT 2, Tabela 4), determina uma rápida drenagem de água devido à criação de um gradiente de potencial total alto (Reichardt, 1985). Os valores de potencial matricial (Ψ_m) calculados a partir dos dados de umidade da tabela 4 e dos coeficientes de ajuste da equação de van Genuchten (1978) (Tabela 5) praticamente são os

mesmos nos diferentes tempos de drenagem no MT1, mas diminuem rapidamente no MT 2 devido à ação do potencial matricial (Ψ_m) presente na interface entre o solo úmido e o solo seco. Neste último, os solos argilosos apresentaram valores de umidade (U) e de potencial matricial (Ψ_m) muito semelhantes e menores que os determinados no método do MT 1. No MT 2 os valores de potencial matricial, após 24 horas de drenagem, variaram de -42,80 (LE) à -192,03 (TE), evidenciando que nos solos estudados a U_{CC} é atingida em tensões maiores que -330cm de água. Embora a perda relativa de água, pelo MT 2, entre os tempos de drenagem de 0 e 72 tenha sido maior no LE comparado ao TE e LR, o LE atingiu valores de potencial matricial (-202cm de água) muito maiores comparado ao TE (-753cm de água) e LR (-973cm de água) devido ao maior gradiente de potencial total criado pelo alto conteúdo de minerais na fração argila dos solos argilosos (Tabela 2).

Tabela 4. Valores de umidade gravimétrica (U) e potencial matricial (Ψ_m) nos diferentes tempos de drenagem dos diferentes solos para determinação da umidade na capacidade de campo (U_{CC}) pelo Método do Tubo. (MT 1 e MT 2). Valores são média de três repetições.

MT 1						
Solo	LR		TE		LE	
Tempo (h)	U (g g ⁻¹)	Ψ_m (cm H ₂ O)	U (g g ⁻¹)	Ψ_m (cm H ₂ O)	U (g g ⁻¹)	Ψ_m (cm H ₂ O)
0	0,5037 a A	-13,67	0,4855 a A	-16,20	0,3467 a B	-12,42
24	0,4976 a A	-14,30	0,4801 a A	-16,91	0,3400 a B	-13,47
48	0,4978 a A	-14,28	0,4699 a A	-18,34	0,3242 a B	-16,10
72	0,4935 a A	-14,75	0,4610 a A	-19,76	0,3205 a B	16,76
$\bar{X}$	0,5037 a A		0,4741 a A		0,3329 a A	
MT 2						
0	0,5037 a A	-13,67	0,4855 a A	-16,20	0,3467 a B	-12,42
24	0,3092 b A	-126,98	0,2908 b A	-192,03	0,2318 b B	-42,80
48	0,2851 b A	-219,76	0,2754 bc A	-281,82	0,2020 b B	-62,45
72	0,2438 c A	-973,51	0,2459 c A	-753,76	0,1388 c B	-202,33
$\bar{X}$	0,3355 b A		0,3244 b A		0,2298 b B	

Letras minúsculas diferentes apresentam significância (0.05%) teste de Tukey entre os tempos de drenagem. Letras maiúsculas diferentes apresentam significância (0.05%) no Teste de Tukey entre solos.

Tabela 5 Valores de U_s , U_r , α , n , m e coeficiente de correlação (R^2) do modelo modificado de van Genuchten (1978) para a curva característica de retenção de água dos diferentes solos.

Solo	R^2	U_r	U_s	a	n	m
LR	0,99807	0,20698	0,61440	0,09960	2,01573	0,26546
TE	0,99925	0,19121	0,59004	0,12350	15,85661	0,02764
LE	0,99972	0,07201	0,40576	0,08156	2,08069	0,27566

Os valores de U_{CC} não diferiram estatisticamente (Tukey 5%) entre si, dentro de cada solo, pelo MT 1, mas foram significativamente diferentes no MT 2. Os valores de potencial matricial ($-\Psi_m$) após 24 horas de drenagem já eram menores que os determinados à uma tensão de -100cm de água, e mesmo após 72 horas ainda não haviam atingido tensões próximas à -330cm de água, confirmando valores de U_{CC} determinados previamente para estes solos em condições de campo (Costa *et al.*, 1989). No LE os valores de U_{CC} foram sempre menores e diferiram estatisticamente dos determinados para a TE e o LR, mas os valores correspondentes de potenciais maiores, o que indica que embora o conteúdo de água do solo de textura média seja menor que nos solos argilosos, a energia com que esta água está retida (seu potencial matricial, Ψ_m) é menor, podendo ser mais facilmente absorvida pelas raízes dos vegetais (Furr e Reeve, 1945; Haise *et al.*, 1955; Slatyer, 1957; Obi, 1974). O método do tubo, MT 2, com a colocação de uma parte do solo seco abaixo do saturado, pode ser ainda aperfeiçoado para a determinação da U_{CC} , avaliando-se diferentes relações entre massa do solo saturado/massa do solo seco; tempo de amostragem do solo após início do processo de drenagem, etc.

Umidade do solo no ponto de murchamento permanente (U_{PMP})

Os valores de U_{PMP} na tensão de -15.000cm de água obtidas pela SCPR (Tabela 3) para os solos argilosos (LR, TE) são muito semelhantes e cerca de 3 vezes maiores que os valores obtidos para o LE, devido ao seu maior teor de argila, já que esta é a principal característica que afeta a retenção de água em tensões muito negativas (Salter e Williams, 1965; van Wambeke, 1974, Arruda *et al.*, 1987; Costa *et al.*, 1989).

Os valores de U_{PMP} determinados pelo método biológico (Embrapa, 1979) para diferentes culturas utilizadas foram muito próximos aos valores de U_{PMP} determinados pelo SCPR na tensão de -15.000cm de

H₂O (Slatyer, 1957; Obi, 1974). No LR e TE as culturas atingiram a U_{PMP} em umidade menor, conseqüentemente potenciais matriciais menores do que quando determinados pelo SCPR na tensão de -15.000cm água, sendo que as culturas monocotiledôneas apresentaram os menores valores de U_{PMP}, conforme foi observado anteriormente por outros autores (Furr e Reeve, 1945; Obi, 1974; Fernandes *et al.*, 1978).

Tabela 6. Valores de umidade gravimétrica (U) para os diferentes solos no ponto de murchamento permanente (U_{PMP}) determinados pelo Método Biológico (MB) para diferentes culturas. Valores são médias de três repetições.

Cultura	LR U (g g ⁻¹)	TE U (g g ⁻¹)	LE U (g g ⁻¹)
Arroz	0,1911 c A	0,1991 ab A	0,0699 bc B
Feijão	0,2063 ab A	0,1980 ab A	0,0777 abc B
Girassol	0,2058 ab A	0,1955 ab B	0,0847 a C
Milho	0,2055 ab A	0,1829 c B	0,0737 abc C
Soja	0,2086 ab A	0,1936 abc B	0,0787 ab C
Sorgo	0,2039 ab A	0,1869 bc B	0,0747 abc C
Trigo	0,1974 bc A	0,2018 a A	0,0657 c B
$\bar{X}$	0,2027 c A	0,1940 c B	0,0750 abc C
Solo	0,2144 a A	0,2030 a B	0,0771 abc C

Letras minúsculas diferentes apresentam significância (0.05%) teste de Tukey entre as culturas. Letras maiúsculas diferentes apresentam significância (0.05%) no Teste de Tukey entre solos.

No LE, o girassol, o feijão e a soja atingiram o PMP em umidade maior que os determinados pelo SCPR na tensão de -15.000cm água, evidenciando que a disponibilidade de água em solos arenosos em tensões próximas a -15.000cm de água, é menor para as culturas, determinando que estas entrem em murcha, em tensões maiores. Embora as pequenas variações nos valores de U_{PMP} determinados para as diferentes culturas, os valores médios para cada solo não foram estatisticamente diferentes (P>0,05) aos determinados no SCPR (Tabela 6).

Água disponível (AD) dos solos

A partir dos valores de umidade na U_{CC} e U_{PMP} determinados pelo SCPR e MB foi calculada a quantidade de água disponível (AD) (Tabela 7) para 1 m de solo, assumindo-se os valores de densidade global medidos a campo (Tabela 2). Embora os solos argilosos (LR, TE) apresentem maiores teores de água nas tensões de -60, -100, -330 e -

15.000cm de água (Tabela 3) que o LE, os valores de AD dos solos estão na mesma ordem de variação (Sanches, 1981; Uehara e Gillman, 1981). A TE possui uma maior microporosidade, um maior teor de matéria orgânica (Tabelas 1, e 2) e uma mineralogia na fração argila mais ativa que os latossolos (Costa, 1996) e apresentou os maiores valores de AD (Salter e Williams, 1965; Costa *et al.*, 1989). O LE e o LR na tensão de -330cm de água possuem valores de AD estatisticamente semelhantes (Tabela 7), embora a diferença no conteúdo de argila entre os solos (Tabela 1). O LR apresentou os menores valores de AD nas diferentes tensões, mas na tensão de -60cm de água, o valor não é estatisticamente diferente (Tukey 5%) da TE.

Tabela 7. Valores de água disponível (AD) dos diferentes solos calculados utilizando o sistema de câmara de pressão de Richards (SCPR) e funil de Büchner (FB), para diferentes valores de umidade na capacidade de campo (U_{CC}). Valores são médias de três repetições.

Solo	AD (mm $H_2O \cdot m^{-1}$ solo)		
	$U_{60}-U_{15.000}$	$U_{100}-U_{15.000}$	$U_{330}-U_{15.000}$
LR	167 b A	118 c B	63 b C
TE	184 a A	149 a B	93 a C
LE	191 a A	133 b B	70 b C
$\bar{X}$	179 A	133 B	75 C

Letras minúsculas diferentes apresentam significância (0.05%) teste de Tukey entre os solos. Letras maiúsculas diferentes apresentam significância (0.05%) no teste de Tukey entre tensões.

Os valores médios de AD em cada tensão, para os diferentes solos, foram estatisticamente diferentes. As variações maiores ocorreram entre as tensões de -100 e -330cm de água, indicando que esta última subestima em mais de 50% o valor de AD, quando comparada com os valores determinados na tensão de -60cm de água (Obi, 1974; Fernandes *et al.*, 1978; Lal, 1979). Os valores de AD calculados a partir dos valores de umidade da tabela 3, mostram que entre as tensões -60 e -100cm de água, há uma diminuição na quantidade de AD de cerca de 20%, já o medido na tensão de -330cm de água é cerca de 50% menor. Estes valores evidenciam que para solos tropicais a U_{CC} é mais corretamente determinada em tensões próximas de -100cm de água pois tensões menores, como -330cm, tendem a subestimar os valores de AD como

observado por outros autores (Pereira, 1957; Oliveira e Queiroz, 1975; Wolf, 1975; Lal, 1979).

Os valores de AD determinados nos diferentes tempos de drenagem dos três solos pelo método do tubo (MT 1) foram muito altos e não variaram estatisticamente com o tempo, reforçando a idéia que nestas condições, não há drenagem da água gravitacional presente nos macroporos devido à inexistência de um gradiente de potencial matricial (Ψ_m), força necessária para remover o excesso de água (Tabela 8).

Tabela 8. Valores de água disponível (AD) dos diferentes solos calculados nos diferentes tempos de drenagem utilizando dados de umidade determinados pelo método do tubo (MT 1 e MT 2) e os valores de U_{PMP} obtidos do método biológico. Valores são médias de três repetições.

Solo	MT 1 - AD (mm H ₂ O . m ⁻¹ solo)		
	24 horas	48 horas	72 horas
LR	327 a A	327 a A	322 a A
TE	354 a A	341 a A	330 a A
LE	389 a A	366 a A	360 a A
$\bar{X}$	357 A	345 A	337 A
MT 2			
LR	118 b A	91 b A	45 a B
TE	119 b A	110 b AB	63 ab B
LE	230 a A	186 a A	93 b B
$\bar{X}$	156 A	129 B	67 C

Letras minúsculas diferentes apresentam significância (0.05%) teste de Tukey entre os solos. Letras maiúsculas diferentes apresentam significância (0.05%) no teste de Tukey entre tempos

Quando foi colocado um tubo de solo seco sob o solo saturado (MT 2), a drenagem do excesso de água foi rápida e os valores de AD diminuíram e foram estatisticamente diferentes em função do tempo, contrastando com os resultados obtidos pelo MT 1. Após 24 horas, os solos argilosos (LR e TE) apresentaram valores de AD semelhantes aos obtidos entre as tensões de -100 e -15.000cm de água medidos pelo método do SCPR (Tabela 7). Se considerarmos que 24 horas foi o tempo definido inicialmente (Veihmeyer e Hendrickson, 1949) para determinação da U_{CC} em condições de campo, o método do tubo, MT 2, simulou estas condições em condições de laboratório. No método MT 2, o LE apresentou os maiores valores de AD independente do momento em que foi determinada a umidade, resultado semelhante ao observado

quando determinado pelo SCPR (Tabela 7) nas tensões de -100 e -300cm de água. Isto indica, novamente, que embora os valores de umidade observados no LE são sempre menores que os observados nos solos argilosos, este solo apresenta capacidade de reter água, igual ou superior ao LR argiloso (Wolf, 1975; Sanches, 1981; Uehara e Gilman, 1981; Costa *et al.*, 1989; Costa e Coelho, 1989). Com os resultados acima, na impossibilidade de possuir equipamentos sofisticados como o SCPR ou FB, podem-se determinar os valores de U_{CC} , U_{PMP} , e AD utilizando de métodos simples como o do tubo (MT 2) e o método biológico (MB).

CONCLUSÕES

1. Baseando-se nos resultados obtidos, pode-se concluir que na determinação de parâmetros hídricos de solos como U_{CC} , U_{PMP} , e AD não é necessária a utilização de metodologias caras e demoradas como as que utilizam funis de Büchner (FB) e ou o sistema de câmara de pressão de Richards (SCPR). Métodos alternativos como o método do tubo (MT 2) são mais rápidos, baratos e reproduzem os resultados obtidos pelos métodos tradicionais. O Método Biológico (MB), embora apresente a limitação de envolver maior trabalho para sua determinação, apresentou resultados estatisticamente semelhantes aos determinados pelo SCPR.
2. Os valores de U_{CC} , para os solos utilizados, podem ser determinados em condições de laboratório, pelo método do tubo (MT 2) após 24 horas de drenagem, com resultados próximos aos determinados, considerando-se uma tensão ou pressão de ar equivalente a 60 ou 100cm de água no funil de Büchner ou no SCPR. Valores de U_{CC} determinados após tempos maiores que 24 horas no MT 2 para os solos argilosos resultaram em tensões menores que -200cm de água.
3. A maioria das culturas testadas entraram num processo de murchamento permanente em valores de umidade a tensões muito próximas de -15.000cm de água medido pelo SCPR.
4. Os solos TE e o LE, apesar das diferenças em suas características químicas e físicas, apresentaram os maiores valores de AD independentes da metodologia utilizada nas diferentes tensões, e tempos de drenagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRUDA, F.B., ZULLO JR., J. & OLIVEIRA J.B. de. Parâmetros de solo para cálculo da água disponível com base na textura do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:11-15, 1987.
- BRIGGS, L.J. & SHANTZ, H.L. The wilting coefficient and its indirect determination. *Bot. Gaz.*, 53:20-37, 1912.
- BRIGGS, L.J. & SHANTZ, H.L. Relative water requirements of plants. *J. Agric. Res.*, 3:1-63, 1914.
- COSTA, A.C.S. da *Iron oxide mineralogy of soils derived from volcanic rocks in the Paraná River Basin, Brazil*. Columbus, 1996. Tese (Ph.D. em Agronomia) - The Ohio State University.
- COSTA, A.C.S. da., LIBARDI, P.L., MORAES, S.O. & REICHARDT, K. Retenção e movimento da água de um solo Terra Roxa Estruturada. In: ENCONTRO CIENTÍFICO DA UEM, 3, 1989, Maringá. *Anais...* Maringá: Fuem, 1989.
- COSTA, A.C.S. da & COELHO, S.M.R. Manejo do solo e seus efeitos nas suas características físicas e hídricas. In: ENCONTRO CIENTÍFICO DA UEM, 3, 1989, Maringá. *Anais...* Maringá: Fuem.
- ELRICK, D.E.F., & TANNER, C.B. Influence of sample pretreatment on soil moisture retention. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 10:124-135, 1955.
- EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual de métodos de análise do solo*. Rio de Janeiro, 1979.
- EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Levantamento de Reconhecimento dos solos do Estado do Paraná. *Boletim Técnico*, (57):791, 1984.
- ESTADOS UNIDOS. Soil taxonomy; a basic system of soil classification for making and interpreting soil survey. Washington: USDA, 1975. 75 p. (Agriculture Handbook, 436)
- FERNANDES, B., RESENDE, M. & REZENDE, S.B. Caracterização de alguns solos sob cerrado e disponibilidade de água para culturas. *Experientiae*, 24(9):211-260, 1978.
- FURR, J.R., & REEVE, J.O. The range of soil moisture percentages through which plants undergo permanent wilting point in some soils from semi-arid irrigated areas. *J. Agric. Res.*, 71:149-170, 1945.
- GENUCHTEN, M.TH. van. Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form model. *Res. Rep.*, 78, 1978.
- HAISE, H.R., HAAS, H.J. & JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity related to 1/3 atmosphere percentage and minimum point related to 15 and 26 atmosphere percentages. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 10:20-25, 1955.
- KIEHL, E.J. *Manual de edafologia*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.
- KUMAR, S., MALIK, R.S. & DAHIYA, I.S. Influence of different organic wastes upon water retention, transmission and contact characteristics of sandy soils. *J. Soil Res.*, 23:131-136, 1985.

- LAL, R. Physical properties and moisture characteristics of some Nigerian soils. *Geoderma*, 21:209-223, 1979.
- MILLAR, A. Manejo racional da irrigação: Uso de informações básicas sobre diferentes culturas. Brasília, II. CA, 1984. (Série Publicações Miscelâneas, n. 461).
- OBI, A.O. The wilting point and available moisture in tropical forest soils of Nigeria. *Exp. Agric.*, 10:305-312, 1974.
- OLIVEIRA, L.B. & QUEIROZ, E.M. de Moisture tension curves of North Eastern Brazil. *Pesq. Agrop. Bras.*, 10:69-75, 1975.
- PEREIRA, H.C. Field measurement of water use for irrigation control in Kenya. *Emp. J. Exp. Agric.*, 49:459-467, 1957.
- REICHARDT, K. *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. Campinas: Fundação Cargill, 1985
- SALTER, P.J. & WILLIAMS, J.B. The influence of texture on the moisture characteristics of soil. I. A critical comparison of techniques for determining the available water capacity and moisture characteristics curve of a soil. *J. Soil Sci.*, 16:1-15, 1965.
- SANCHES, P.A. *Suelos del tropico. Características y manejo*. Costa Rica: IICA, 1981
- SHARMA, M.L. & UEHARA, G. Influence of soil structure on water relation in low humic latosols. I. Water retention. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32:765-774, 1968.
- SLATYER, R.O. The influence of progressive increases in total soil moisture stress, transpiration, growth and internal water relationship of plants. *Aust. J. Biol. Sci.*, 10:320-336, 1957.
- UEHARA, G. & GILLMAN, G. *The Mineralogy, Chemistry and Physics of Tropical Soils with Variable Charge Clays*. Colorado: Westview Tropical Agriculture, 1981.
- WAMBEKE, A. van. Management properties of ferrasols. *Soils Bull.* 23, Rome: FAO, 1974.
- VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentages of soils. *Science*, 68:75-94, 1949.
- WALKLEY, A. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils. Effect of variation in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.*, 63:251-264, 1947.
- WOLF, J.M. & ALVARADO, Y.A. (eds.). *Soil Management in Tropical Latin America*. Raleigh: North Caroline State University, 1975. p. 145-153.