

PARÂMETROS DE SOLO EM FUNÇÃO DA UMIDADE NA CAPACIDADE DE CAMPO EM ÁREAS IRRIGÁVEIS DO TRÓPICO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO¹

ADERALDO DE SOUZA SILVA², LUIZA TEIXEIRA DE LIMA BRITO³,
CARLOS ALBERTO VASCONCELOS DE OLIVEIRA⁴ e ANTONIO WILLIAMS MOITA⁵

RESUMO - Simulou-se, através de um modelo matemático sequencial, os principais parâmetros do solo: estimativas de umidade no ponto de murcha permanente (PMP) a 1,5 MPa, e curvas de retenção de água por meio da correspondência da umidade do solo no ponto de capacidade de campo (CC). Usando-se técnicas de superfícies de resposta, obtiveram-se as classificações texturais em função da disponibilidade total de água no solo (DTA), em m³/ha por cm, que facilitou a aplicação prática dos resultados. O modelo, com base na análise de 4.288 amostras, permite estimar as variáveis relacionadas, com um grau de significância superior a 0,01. A validação de campo mostrou ser aplicável aos agricultores de áreas irrigáveis que ainda não têm acesso às informações obtidas em laboratório.

Termos para indexação: irrigação, curvas de retenção de água, classes hídricas.

HUMIDITY-DETERMINED SOIL PARAMETERS ON THE FIELD CAPACITY OF IRRIGABLE AREAS OF THE BRAZILIAN SEMI-ARID TROPICS

ABSTRACT - Using a sequential mathematical model, a simulation was made of the principal soil parameters: estimation of humidity at the permanent wilting point (PWP) (1.5 MPa) and water retention curves by means of the corresponding soil humidity at the field capacity point (FCP). Using response surface techniques, textural classifications based on total water availability (TWA) of the soil (m³/ha per cm) were obtained, facilitating the practical application of the results. The model developed, based on the analysis of 4,288 samples, allowed an estimate to be made of related variables, with a degree of significance superior to 0,01. Field validation proved to be applicable to farmers in irrigable areas who still do not have access to information obtained in the laboratory.

Index terms: soil parameters, irrigation, water retention curve, hydric classes.

INTRODUÇÃO

As regiões áridas e semi-áridas dispõem de significativo potencial para a irrigação de suas terras. Entretanto, limitações básicas restringem a implementação de programas regionais. Tais limitações podem ser: 1. a insuficiência de laboratórios de análise das constantes físico-hídricas do solo; 2. a insuficiência de pessoal técnico especializado e de assistência técnica; 3. a lentidão na elaboração e avaliação de projetos de irrigação; 4. a baixa precisão nos ba-

lanços hídricos de áreas extensas (Weaver & Keller 1985, Brasil 1986).

Avanços foram conseguidos visando reduzir estas limitações, através do uso de técnicas simples conjugadas a recursos computacionais e validados no meio rural; tais avanços possibilitam fazer extrapolações, dentro de intervalos de confiança aceitáveis ou significativamente superiores aos procedimentos em uso (Linsley Junior et al. 1982, Kalman & Martinez 1982).

Os principais fatores restritivos estão relacionados com a disponibilidade total de água que um solo pode armazenar (DTA), (Hussein 1983), e depende da exata mensuração do limite máximo, normalmente a umidade na capacidade de campo (CC) e o limite mínimo representado pela umidade no ponto de murcha permanente (PMP) da água disponível no solo para as plantas.

¹ Aceito para publicação em 9 de agosto de 1989.

² Eng.-Agr., M.Sc. em Irrigação e Drenagem, EMBRAPA-Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA), Caixa Postal 23, 56300, Petrolina, PE.

³ Eng.-Agrícola, EMBRAPA-CPATSA.

⁴ Estatístico, EMBRAPA-CPATSA.

⁵ Matemático, EMBRAPA, Brasília, DF.

Inúmeros trabalhos realizados comprovaram que na maioria dos solos irrigáveis e na maioria das condições agroecológicas o solo se encontra no ponto de CC quando o potencial matricial de água oscila em torno de 0,03 MPa e no ponto de PMP, quando este oscila em torno de 1,5 MPa. Por este motivo, é comum determinar-se CC e PMP em laboratório, para as tensões de 0,03 e 1,5 MPa, respectivamente (Reichardt 1987).

A revisão dos métodos usados para a determinação dos limites destes parâmetros indica que, embora as determinações "in situ" sejam mais exatas, estas podem ser muito laboriosas (Hussein 1983), e que cálculos em laboratórios utilizando a determinação da retenção de água no solo são preferíveis para as rotinas de análises.

A remoção da água do solo pode ser feita rapidamente através de sua evaporação, com o aquecimento promovido pela queima do álcool hidratado automotivo, de acordo com Pruski et al. (1986); tal prova apresenta possibilidades de uso em condições de campo, em função da pequena dispersão de umidade encontrada (0,5%), a qual foi detectada quando o teor de umidade do solo esteve em torno de 23% em peso.

Hussein (1983) melhorou um método de cálculo da CC, com base em avaliações empíricas dos dados coletados para os solos de Zimbábue, relacionando-o a um potencial matricial de água no solo específico, através de equações lineares. Estas relações também foram avaliadas mais profundamente por Arruda et al. (1987), que obtiveram modelos práticos de equações na relação entre a umidade do solo na capacidade de campo e o teor de argila mais silte, para oito classes de textura do solo, visando a seu uso como paliativo à falta de serviços e laboratórios comerciais que façam essas determinações de retenção de água no solo.

Um modelo matemático que estima a relação tensão/umidade, quando não se dispõe de recursos adequados para se obter a curva de retenção de água em laboratório, foi desenvolvido por Vélez (1963), citado por Aguilera Contreras & Martínez Elizondo (1980), que permite simular os pontos de tensão entre a CC e o PMP.

A maioria dos estudos têm aplicações restritivas para recomendação de manejo de solo e água em zonas áridas e semiáridas, pois são limitados em termos de representatividade – quando se deseja fazer generalizações, em face do baixo número de amostras usadas, da falta de especificações referentes às am-

plitudes de variações dos resultados expressos, e também em face da dependência de alguma análise em condições de laboratório, principalmente os comerciais, ainda limitados em número, além de serem inacessíveis aos pequenos agricultores das áreas irrigáveis do Nordeste.

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um procedimento simplificado, através de tabelas e gráficos, que permita estimar curvas de retenção e a quantidade de água disponível no solo em função de uma única variável – a umidade em CC determinada "in situ" –, para fins de projeto e manejo de áreas irrigáveis no Trópico Semi-Árido brasileiro.

MATERIAL E MÉTODOS

Para estimar os parâmetros físico-hídricos do solo, através de uma única variável, utilizaram 4.853 amostras, coletadas em diversos locais do Trópico Semi-Árido brasileiro (TSA), englobando os principais solos agricultáveis e irrigáveis da região em classes texturais. As amostras foram coletadas nos horizontes A e B, até 60 cm de profundidade, a partir da superfície natural do terreno. Destas 4.853 amostras, apenas 4.288 formaram o banco de dados, sendo as restantes eliminadas devido às distorções encontradas nos dados.

As amostras foram analisadas nos laboratórios de solos da EMBRAPA/CPATSA e CODEVASF/SUDENE, em Petrolina (PE), DG/CEPLAC/EACA/UFBA, em Cruz das Almas (BA) e, CCA/UFPB em Areia (PB), segundo metodologia do Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (SNLCS), pertencente à EMBRAPA.

Cada amostra continha os teores de Areia (MA), Silte (MB) e Argila (MC) e Argila natural (MD), e as umidades nas tensões de 0,03 MPa na capacitação de campo (CC) e 1,5 MPa no ponto de murcha permanente (PMP), além da densidade global (Dg) ou densidade aparente (Da) em g/cm³.

As amostras foram submetidas a um estudo preliminar de consistência de dados, considerando-se os limites da classificação textural em função da disponibilidade total de armazenamento de água no solo (DTA), seguindo-se as amplitudes de variação adotadas pelo Serviço Nacional de Conservação de Solos dos Estados Unidos da América do Norte, citadas por Bernardo (1986), o qual classifica, em solos de textura grossa de 4,0 a 8,0 m³/ha/cm, solos de tex-

tura média de 8,0 a 16 m³/ha/cm e solos de textura fina de 12 a 24 m³/ha/cm de profundidade de solo.

Os limites das propriedades físico-hídricas do solo, após a análise de consistência, considerados como definitivos, continham os teores de MA de 1 a 96%, MB de 0 a 75%, MC de 1 a 70%, MD de 0 a 52%, Dg de 0,96 a 1,88 g/cm³, CC (a 0,03 MPa) de 3,69 a 43,94% e os de PMP (a 1,5 PMa) de 1,0 a 25,16%.

A umidade foi determinada nas profundidades de 0,0 a 0,10, 0,10 a 0,30 e 0,30 a 0,60 m, baseada na associação dos métodos dinâmicos descritos por Ca-

vazza et al. (1973), Aguilera Contreras & Martínez Elizondo (1980) e Pruski et al. (1986). O procedimento consistiu em se preparar, para cada tipo de solo estudado, duas microbacias circunscritas de 3,0 m x 3,0 m e 1,0 m x 1,0 m, limitadas por bordos de 0,30 m x 0,50 m, respectivamente, onde se umedeceu o perfil do solo com uma lâmina de água de 0,30 m. Nestas, foram permitidas apenas condições de drenagem natural (Fig. 1).

Os teores de umidade, em função de tempo e espaço, foram monitorados e posteriormente plotados em papel milimetrado, estimando-se a umidade do

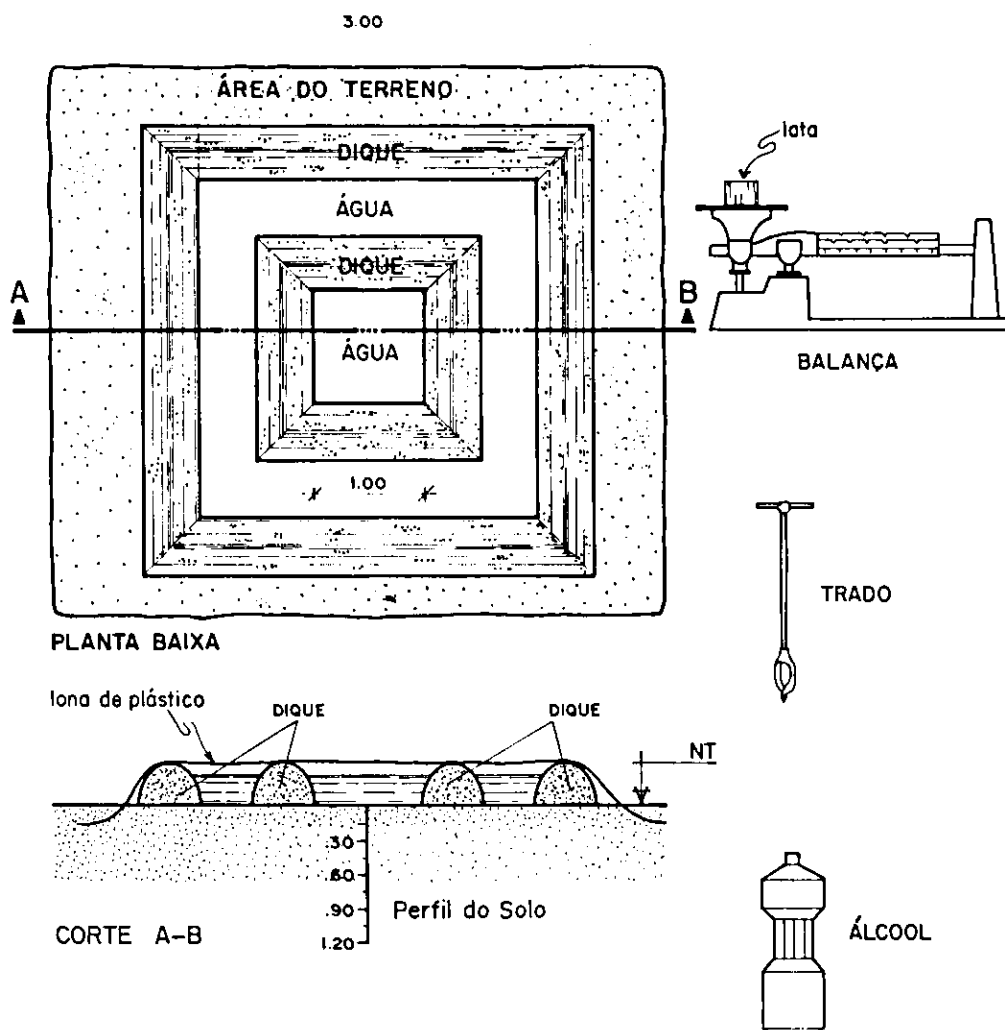


FIG. 1. Modelo esquemático de sistematização, saturação e coleta de amostras de solo na bacia de inundação, para determinação da capacidade de campo "in situ".

solo na capacidade de campo (CC) "in situ", como sendo aquele ponto no gráfico a partir do qual a direção da curva mudava abruptamente (Fernandez Medina & Oliveira Junior 1987). Para cada textura de solo (grossa, média e fina), foram coletadas 14 amostras com 20 repetições, perfazendo um total de 280. Cada repetição foi subdividida em duas, no momento da coleta, para efeito de comparação de métodos. Assim, uma bateria de 140 amostras tinha a CC determinada "in situ", usando-se 0,6 ml de álcool hidratado automotivo por grama de solo (Pruski et al. 1986), enquanto a outra similar era removida ao laboratório e determinada em estufa a 105-110°C.

Em função dos coeficientes de correlação encontrados na análise do banco de dados, este banco foi subdividido em três outros, denominados de textura grossa, média e fina, cada banco contendo 1.458, 1.988 e 842 amostras, respectivamente. Definuiu-se como procedimento metodológico a seleção do maior valor absoluto obtido em forma seqüenciada a partir da variável que mais se correlacionou com a CC, que foi a umidade do solo em PMP. Assim, o modelo consistiu, primeiramente, em obter equações de ajustes para o valor de PMP em função do valor de CC, para os três tipos de textura; em seguida, determinou-se, por meio de técnicas de superfície de resposta, o que se denominou de "classes hídricas", ou seja, classes de disponibilidade total de água no solo (DTA), em m³/ha/cm de profundidade de solo, em função de CC, PMP e Dg, variáveis já estimadas nesta ordem seqüencial, cuja equação convencional é representada pela fórmula: $DTA = \{[(CC-PMP)/10] \times Dg\} \times 10$ (Reichardt 1987).

O conteúdo de água foi estabelecido por gravimetria, após equilíbrio das tensões de 0,01, 0,03, 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 1,0, e 1,5 MPa em extrator de placa a pressão, em um mesmo número de amostras, e às mesmas profundidades das usadas na determinação da CC, segundo metodologia descrita por Richards (1965).

A simulação dos pontos entre a CC e PMP se fez por meio de dois modelos matemáticos.

O primeiro, hiperbólico, baseou-se em uma equação tipo exponencial, cuja fórmula se expressa da seguinte maneira:

$$T = (K/(P_s \hat{N}) + C), \text{ onde:}$$

T : tensão do solo (MPa);

P_s : umidade do solo (% em peso),

K, N : constantes que dependem da textura, estrutura e compactação do solo (adimensionais).

C é um fator de correção da textura do solo, e obtém-se através da fórmula:

$$C = (-0,00014 \times (CC^{2,7}) + 0,03), \text{ onde:}$$

CC é a umidade do solo (% em peso) na capacidade de campo - CC(0,03 MPa);

N e K são obtidos em função de C, da umidade (% em peso) no ponto de murcha permanente (PMP) a 1,5 MPa e de CC, usando-se as equações:

$$N = \{[\text{Log}(1,5-C) - \text{Log}(0,03-C)] / [\text{Log}(CC) - \text{Log}(PMP)]\}$$

$\text{Log}(K) = \text{Log}(1,5-C) + N \times \text{Log}(PMP)$, sendo $K = \text{Exp}(K)$.

A percentagem de umidade do solo em função da tensão é encontrada aplicando-se a equação:

$$P_s = K/(T-C)^{(1/N)}$$

Seguindo-se procedimento anterior, e após se ter fixado o valor de C para as condições do Semi-Árido, foram simuladas várias curvas de retenção de água no solo em função das duas variáveis independentes, necessárias aos cálculos deste modelo, que são as umidades do solo no ponto de CC e no ponto de PMP.

Já o modelo matemático seqüencial fundamentou-se em se estimar, em primeiro lugar, o teor de umidade do solo - T3(% em peso) -, correspondente a uma tensão de 0,05 MPa em função do teor de umidade em CC (0,03 MPa), considerando a seguinte relação: $T3 = a + bCC$. Conhecido o primeiro ponto da curva de retenção de água no solo, estimou-se o segundo e o terceiro pontos, correspondentes às tensões de 0,01 MPa e 0,1 MPa, em função do teor de umidade a 0,05 MPa, já conhecido anteriormente, com as seguintes relações: $T1 = a + bT3$ e $T4 = a + bT3$. O quarto ponto da curva foi estimado em função do teor de umidade obtido para 0,1 MPa, com relação de $T5 = a + bT4$; o quinto ponto correspondente a T6, obteve-se em função do teor de umidade estimado para uma tensão de 0,2 MPa, com uma relação de $T6 = a + bT5$, e assim sucessivamente. Este procedimento metodológico permitiu o conhecimento de todos os pontos da curva de retenção de água no solo, através de uma única variável independente, a umidade (% em peso) no ponto de capacidade de campo - CC(0,03 MPa).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias das percentagens de umidade do solo (% em peso), determinadas "in situ" com o emprego de álcool hidratado automotivo (CA), e no laboratório através do método da estufa-ME (105-110 °C), para diferentes tipos de solo, são apresentadas na Fig. 2.

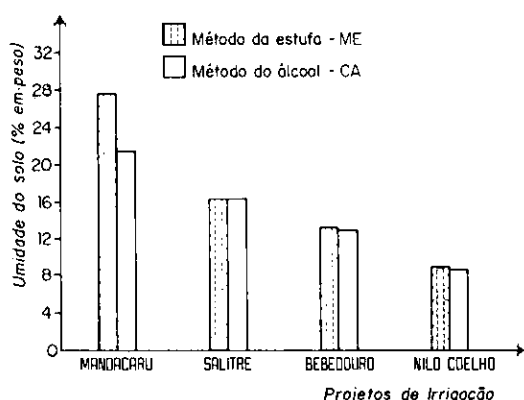


FIG. 2. Percentagens de umidade do solo (% em peso), determinadas "in situ" e no laboratório, para diferentes tipos de solo encontrados nos projetos de irrigação.

Os valores numéricos relativos ao teste t, usado para comparar as médias de umidade do solo entre os métodos CA e ME expressos na Fig. 2, não atingiram o limite de 5%. Conclui-se que não existe diferença significativa, para as determinações de umidade pelos dois métodos, em solos de textura grossa e média, representados pelos tipos de solos encontrados nos projetos de irrigação Senador Nilo Coelho ($P > 0,06$) e Bebedouro ($P > 0,15$), em Petrolina, PE, e no Salitre ($P > 0,9$), em Juazeiro, BA, respectivamente. O mesmo não ocorreu quando foram comparados os dois métodos em solos de textura fina, especificamente nos vertissolos do Projeto de Irrigação de Mandacaru ($P > 0,0001$), em Juazeiro, BA, com teores de umidade, argila e silte ao redor de 27%, 61% e 12%, respectivamente. Essas diferenças estatísticas foram altamente significativas (Fig. 3).

No caso de solos minerais com 30% ou mais de argila, imperfeita definição de horizontes, argila de atividade bastante alta, mostrando mudanças distintas de volume com variação do conteúdo de água no solo, evidenciadas por fendas em algum período na maioria dos anos, à semelhança dos solos de Mandacaru, é necessário desenvolver um modelo matemático de ajuste, que permita através do valor da CC determinada pelo método do álcool (CA), obter o valor da umidade do solo no ponto de capacidade de campo correspondente em estufa (ME), usando-se a equação $ME = 52,65 - 6,9231CA + 0,4523CA^2 - 0,00854368CA^3$. Os resultados (Fig. 3) indicam correlações significativas ao nível de 1% entre as médias das variáveis ME e CA, com desvios padrões inferiores a 0,14, os quais são inerentes à própria

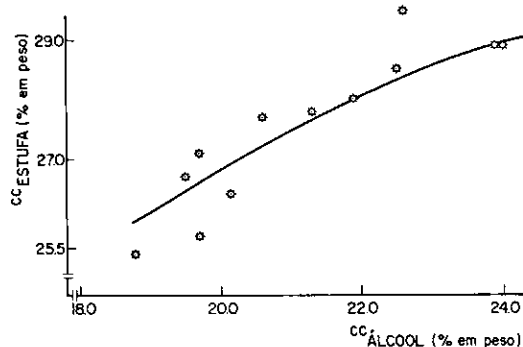


FIG. 3. Relação entre a umidade do solo (% em peso) na capacidade de campo determinada "in situ" e laboratório, em vertissolos.

variabilidade da textura, estrutura, teor de matéria orgânica e estratificação, cujos quantitativos ficam evidenciados através dos valores de umidade do solo em 14 amostras coletadas em uma mesma localidade, para um mesmo tipo de solo e com 20 repetições.

A distorção encontrada entre os dois métodos, nos solos de textura fina (Fig. 3), com valores de CC iguais ou superiores a 23% de umidade (% em peso), corrobora os resultados obtidos por Pruski et al. (1986).

Por outro lado, acredita-se que alguma defasagem com a equação citada poderá ocorrer em outros tipos de solos; neste caso, outro modelo matemático de ajuste deverá ser desenvolvido. Do mesmo modo, salienta-se a conveniência de efetuar mais estudos que incluam amostras retiradas em outros tipos de solos similares no Semi-Árido nordestino, com características dos solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B textural avermelhado, em sequência a um horizonte A fraco ou raramente moderado, geralmente macio e duro, saturação por bases alta e argila de atividade consideravelmente alta (Camargo et al. 1987).

Verificou-se, também, que os valores de umidade do solo, na capacidade de campo, variaram em torno de 2% para uma mesma textura. Em termos práticos, para fins de irrigação, este percentual não foi significativo no teste de validação no meio rural, dada a grande representatividade das áreas abrangidas pelas amostras que compunham cada textura de solo, todas superiores a 2.000 ha.

Da análise das Figs. 2 e 3 conclui-se que a determinação da CC pelo método direto (de campo), desenvolvido por Pruski et al. (1986), parece ser o meio mais rápido e preciso para obtenção deste pa-

râmetro físico-hídrico do solo sob estudo, no Semi-Árido brasileiro, necessitando de ajustes somente em casos de solos muito argilosos. Para esta condição específica, recomenda-se que a amostra de solo coletada seja bem misturada com o volume do álcool, dividido em duas porções, na proporção de 0,6 ml para cada grama de solo, e que o peso total do solo umedecido depois de misturado não ultrapasse 400 g.

O procedimento descrito e validado em condições de campo, para os solos de textura grossa e média, discorda de que, embora as determinações de campo sejam mais precisas, são muito mais laboriosas (Hussein 1983) que as determinações de rotina em laboratórios.

Relações entre a umidade do solo na capacidade de campo determinada "in situ" e em laboratório, estimadas e observadas experimentalmente (% em peso) para diferentes texturas (grossa, média e fina), são apresentadas na Fig. 4.

Sendo baixo o teor de matéria orgânica nas camadas de solos analisados, não se verificaram variações significativas ao nível de 1% de probabilidade entre as duas variáveis, permitindo a análise conjunta das profundidades de 0,0 - 0,10; 0,10 - 0,30 e 0,30 - 0,60 m. Na análise de regressão conseguiu-se uma estreita correlação, para fins práticos em áreas irrigadas, entre a CC determinada "in situ" e a CC obtida em laboratório ($r^2 = 0,96$, $r^2 = 0,847$ e $r^2 = 0,99$, para os solos de textura grossa, média e fina, respectivamente), usando-se o método recomendado por Pruski et al. (1986).

Na Fig. 4, as equações quadráticas: 1) $y = 4,588 - 0,25x + 0,042x^2$; 2) $y = -2,82 + 0,939x + 0,03087x^2$; e 3) $y = -4,072 + 1,72x - 0,01x^2$, que representam as variações da umidade do solo "in situ", em relação às umidades de laboratório, à tensão de 0,03 MPa, apresentam teores de umidade superiores quando determinadas "in situ" para os solos de textura grossa, enquanto nos solos de textura média estes são similares – à exceção dos pontos crescentes nas extremidades inferior e superior, no caso de solos arenosos –, dada a existência de maior conteúdo de água nos solos de textura grossa, quando determinados "in situ", que em laboratório à tensão de 0,03 MPa. Isto é explicado por Fernandez Medina & Oliveira Júnior (1987), cujas melhores médias de umidade do solo, próximas à capacidade de campo, são obtidas em solos arenosos, quando se utiliza o método indireto, em amostras deformadas a uma tensão de 0,01 MPa. Sendo, entretanto, mais comum determinar a CC em laboratório para fins de irrigação a uma tensão de 0,03 MPa (Reichardt 1987), preferiu-se estimar os valores de CC "in situ", em função dos teores de umidade obtidos sob esta tensão.

Os mesmos resultados não foram conseguidos em solos de textura média, uma vez que estes somente foram coincidentes para teores de umidade em torno de 11% a um nível de significância superior a 0,0001, existindo variações para mais e para menos em torno dos pontos extremos, isto é, para os teores de umidade na faixa-limite entre os solos de textura

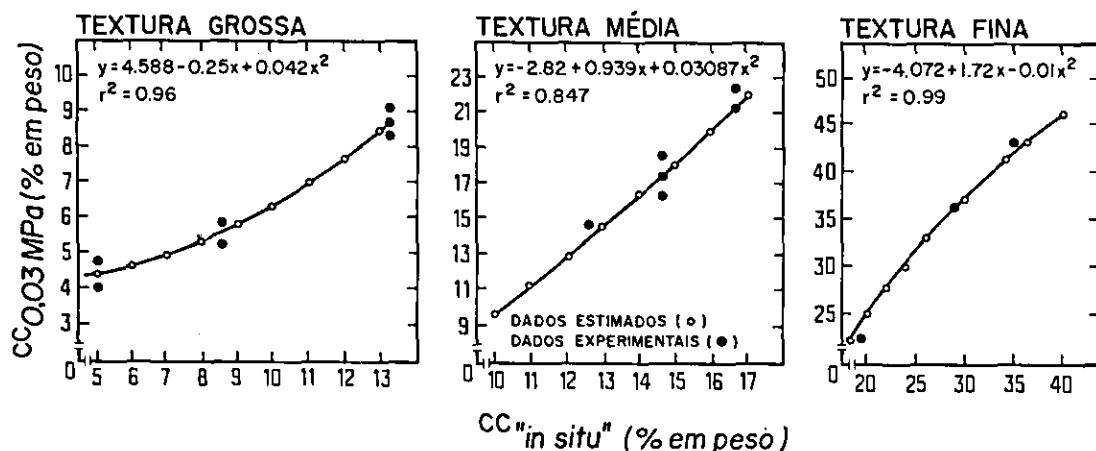


FIG. 4. Relação entre a umidade do solo (% em peso) na capacidade de campo, determinada "in situ" e em laboratório, a 0,03 MPa, para as texturas de solo grossa, média e fina.

grossa e média e os de textura média e fina.

Resultados inversos aos de textura grossa foram obtidos para os solos de textura fina, onde as percentagens de umidade de água no solo (% em peso) determinadas "in situ" sempre foram decrescentes em relação aos teores obtidos em condições de laboratório, apresentando maiores desvios em torno de 28% de umidade.

Mesmo existindo altas correlações entre a CC determinada "in situ" e em laboratório, e mesmo reconhecendo-se utilidade para o manejo da água na agricultura, deve-se levar em consideração uma série de limitações, segundo Reichardt (1987). Isto porque o conceito de capacidade de campo (CC) é muito debatido atualmente, principalmente nos países que usam tecnologias de ponta na área de engenharia de irrigação. Observa-se que a CC não é uma constante representativa de um solo, podendo variar de situação para situação, e que as determinações em laboratório, com uma pressão de 0,03 MPa, na maioria das vezes, não representa as condições de campo, como se demonstra através da Fig. 4. Mesmo assim, considera-se a CC de grande utilidade prática, principalmente no planejamento da irrigação no Semi-Árido brasileiro, onde o manejo das áreas irrigadas e a elaboração de projetos de irrigação em pequenas glebas rurais ainda é incipiente.

Substituindo-se os teores de umidade dos solos de textura grossa (x), na equação 1, entre 4,4 e 7,7% de umidade determinados a 0,03 MPa, obtêm-se valores, entre 5 e 12 (% em peso) para a CC determinada "in situ", ou a tensões de 0,01 MPa. Entretanto, apesar de terem sido usadas 280 amostras na análise, é conveniente efetuar novas comparações para vali-

dação de resultados em outras regiões agroecológicas do Nordeste. Por enquanto, recomenda-se o uso do método direto para estimar a umidade do solo em CC (Pruski et al. 1986), somente para os solos em que esta seja inferior a 23%, tendo em vista as limitações do método em solos orgânicos e muito argilosos.

Estimativa da umidade do solo no ponto de murcha permanente (PMP) – Os resultados do ajuste da variável dependente (PMP), para fins de manejo de solo e água em função de CC, são encontrados na Tabela 1 e na Fig. 5 para os solos de textura grossa, média e fina, respectivamente, nesta ordem sequencial.

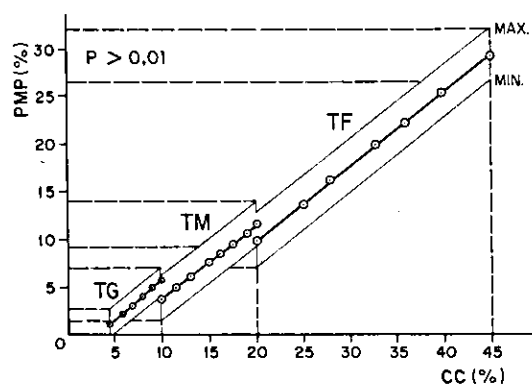


FIG. 5. Valores estimados: mínimos (MIN) e máximos (MAX) para solos de textura grossa (TG), média (TM) e fina (TF). Relação entre a umidade (% em peso) na capacidade de campo (CC) (0,0 MPa) e no ponto de murcha permanente (PMP) (1,5 MPa).

TABELA 1. Estimativa da umidade (% em peso) no ponto de murcha permanente (PMP) a 1,50 MPa, em função da umidade (% em peso) na capacidade de campo (CC) a 0,03 MPa, e o teor de argila mais silte (MC + MB) para diferentes texturas de solos, classificados em função da disponibilidade de água-DTA (m^3/ha por cm do solo).

Equações	Nº de pares	r ²
Textura grossa: 4,0 < DTA < 8,0		
1. PMP = - 2,26319 + 0,8034CC	1458	0,940
2. PMP = 0,17 + 0,197(MC + MB)	1458	0,71
Textura média: 8,0 < DTA < 16,0		
1. PMP = - 3,87112 + 0,7711CC	1988	0,938
2. PMP = - 1,4 + 0,26(MC + MB)	1988	0,96
Textura fina: 12,0 < DTA < 24,0		
1. PMP = - 5,5663 + 0,7737CC	842	0,912
2. PMP = - 0,335 + 0,23(MC + MB)	842	0,66

A variável PMP também foi ajustada em função do teor de argila (MC) mais silte (MB) para efeito comparativo, cujas equações, números de pares usados e coeficientes de correlação são descritos na Tabela 1. A análise estatística mostrou que houve correlações com alto grau de significância ($P > 0,01$), independentemente da textura do solo analisado.

Nesta análise preferiu-se usar curvas de regressão lineares, tendo em vista que as curvas não-lineares complexas atingiram coeficientes de correlação próximo de 1, fazendo com que a curva de regressão e o coeficiente correspondente não fossem coerentes. As equações de regressão lineares entre CC e PMP apresentaram correlações (r^2) de 0,94, 0,938 e 0,912 para os solos de textura grossa, média e fina, respectivamente, muito próximo da unidade, ou seja, a variável dependente PMP é quase totalmente explicada por meio da variável independente CC, em face da alta relação existente entre ambas. Isto permite que se empreguem essas equações em função das classes texturais estudadas, para estimar os teores de umidade do solo no ponto de PMP (1,5 MPa), no Semi-Árido nordestino, a partir unicamente do teor de umidade em CC (0,03 MPa), como as equações 2 da Tabela 1 estimam. Esta umidade em função de CC determinada "in situ" permite estimar a variável PMP com alto grau de significância a partir de sua determinação diretamente no campo, através do método expedito recomendado por Pruski et al. (1986).

Os resultados demonstraram discordância em relação aos encontrados por Arruda et al. (1987), que, trabalhando com solos do estado de São Paulo, verificaram alta correlação entre a CC e PMP e as percentagens de argila mais silte (MC + MB), como se pode observar na Tabela 1. Isso se deve, provavelmente, ao baixo teor de matéria orgânica dos solos do Semi-Árido.

A estimativa do PMP através de modelos matemáticos pode ter utilização prática bem mais expressiva que a umidade do solo na capacidade de campo, já que esta é afetada pela variação da textura do solo, segundo Arruda et al. (1987). A análise da Fig. 5 evidencia esta afirmativa, principalmente quando esta é realizada levando-se em consideração as classes texturais, segundo a disponibilidade de água no perfil do solo.

Na Fig. 5 podem-se observar os valores estimados, mínimos e máximos para solos de textura grossa (TG), média (TM) e fina (TF). Verifica-se que os valores da umidade (% em peso) no ponto de PMP variaram de mais ou menos 1,5% em solos de TG,

enquanto em solos de TM foi de mais ou menos 2,25%, e nos de TF esta variação foi praticamente o dobro da textura grossa, correspondendo a 2,74%. Aparentemente, a existência destes desvios para mais e para menos poderão ser desprezados, quando o objetivo maior de sua utilização for elaboração de projetos de irrigação e cálculos de manejo de áreas irrigáveis.

Ainda da análise dos resultados obtidos, a estimativa de PMP, com grau de significância superior a 0,01, enfatiza a possibilidade de se conhecer a quantidade de água disponível no solo, com base em textura, através da umidade em CC determinada "in situ", principalmente nas áreas irrigáveis do Nordeste, onde os agricultores ainda não têm acesso aos laboratórios de solo.

Os dados analíticos de características hídricas do solo (% em peso) foram submetidos a modelos matemáticos de ajuste sequencial e hiperbólico para as tensões de 0,01, 0,03, 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 e 1,5 MPa, respectivamente, e comparados a curvas de retenção de água, determinadas através de dados experimentais, e estão apresentadas na Fig. 6. Observam-se curvas de retenção de água para solos de textura grossa, média e fina, representativos dos principais perímetros irrigados do Nordeste. A informação é apresentada como umidade do solo (% em peso) em função do potencial matricial de água, em MPa. A análise estatística mostrou que não houve diferenças significativas entre os modelos matemáticos estudados e os resultados obtidos experimentalmente em laboratório ao nível de 1% de probabilidade.

Pelos coeficientes de correlação encontrados na Tabela 2, todos superiores a $r^2 = 0,98$, pode-se concluir que as equações apresentadas para as diferentes tensões estimam com precisão as umidades do solo entre 0,01 e 1,5 MPa, para os diversos tipos de solos estudados. A alta correlação foi estabelecida graças ao procedimento matemático sequencial utilizado, através de regressão simples, considerando como variáveis dependentes as umidades do solo (% em peso) a tensões de 0,05; 0,01; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 e 1,5 MPa e, como variável independente, somente a umidade (% em peso) no ponto de capacidade de campo (CC) a 0,03 MPa. Assim, conhecendo-se somente o valor da umidade em CC, obtêm-se todos os outros pontos da curva de retenção de água no solo.

A diferença entre o modelo matemático sequencial desenvolvido pelo autor e o modelo hiperbólico da autoria de Vélez (1963), citado por Aguilera Contreras & Martinez Elizondo (1980), deve-se a

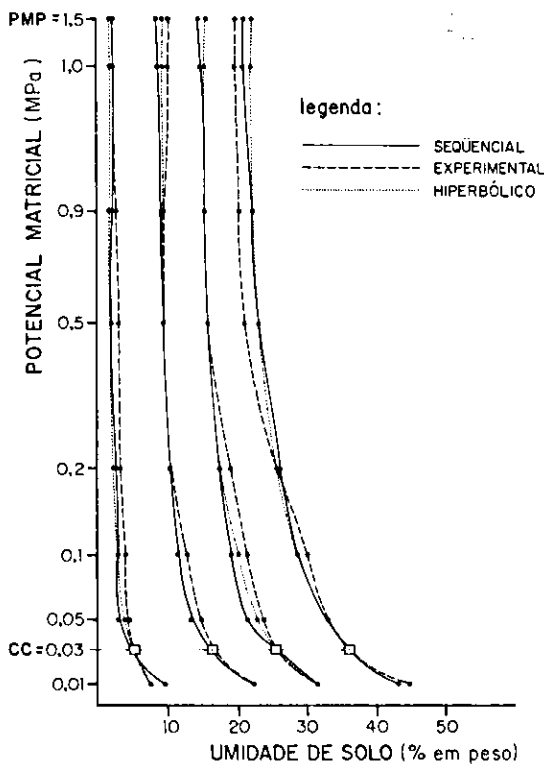


FIG. 6. Curvas de retenção de água no solo, submetidas a modelos matemáticos de ajustes sequencial e hiperbólico, comparadas a curvas experimentais em função da umidade em diferentes potenciais matriciais.

TABELA 2. Equações de regressão, estimadas através de um modelo matemático sequencial, que melhor representam a umidade do solo (% em peso) nas tensões de 0,01(T1), 0,03(CC), 0,05(T3), 0,1(T4), 0,2(T5), 0,5(T6), 1,0(T7) e 1,5(PMP), em MPa.

Equações	Nº de pares	r ²
1. T3 = -0,6845 + 0,931CC	70	0,99
2. T1 = 5,004 + 1,168T3	70	0,99
3. T4 = -1,138 + 0,932T3	70	0,98
4. T5 = -0,063 + 0,868T4	70	0,99
5. T6 = -0,08 + 0,897T5	70	0,99
6. T7 = -0,109 + 0,964T6	70	0,99
7. PMP = -0,114 + 0,96T7	70	0,99

Ordem sequencial: 1, 2, 3, ..., 7.

que o hiperbólico necessita do conhecimento prévio de duas variáveis como a umidade no ponto de PMP e a umidade no ponto de CC, enquanto o modelo matemático sequencial só precisa do conhecimento da umidade em CC. Para efeito comparativo entre os dois modelos discutidos, apresentam-se na Fig. 6, os valores analíticos das características hídricas do solo, submetidos aos modelos sequencial e hiperbólico e comparados com as curvas experimentais de retenção de água, determinadas em laboratório.

Analisando-se as Tabelas 2 e 3 e a Fig. 7, pode-se verificar que o modelo sequencial é mais preciso e estima melhor os dados de umidade nas diferentes tensões, porque o modelo hiperbólico somente simula os pontos entre CC e PMP, enquanto o sequencial, além destes, também estima a umidade a 0,01 MPa, ou seja a 0,1 atm, umidade esta de importância básica, por ser o valor do método indireto que mais proporciona valores médios de umidade do solo próximos aos de capacidade de campo, em amostras deformadas (Fernandez Medina & Oliveira Junior 1987).

A curva de retenção de água no solo é fundamental em estudos que envolvem interações solo/planta, aeração, irrigação, drenagem e movimento de poluentes. Essa curva deve ser determinada no campo, na sua condição estrutural natural. Segundo Lal (1979), citado por Vieira & Castro (1987), os principais inconvenientes são o tempo e o custo. O método de laboratório – cujas amostras com estruturas indeformadas, que são submetidas a pressões fixas em câmaras com placas porosas com pesagem nos pontos de equilíbrio, por várias razões – ainda é inacessível aos técnicos e agricultores de áreas irrigadas, principalmente no Nordeste do País. Por este motivo, acredita-se que o uso do modelo matemático sequencial, exposto na Tabela 2, poderá contribuir para um manejo adequado destas áreas.

Classes hídricas em função da disponibilidade total de água no solo (DTA) – As superfícies de respostas da DTA, em m³/ha por cm, encontram-se na Fig. 8, 9 e 10.

As classes hídricas para os solos de textura grossa, média e fina foram estabelecidas através de regressões múltiplas, considerando-se como variável dependente a umidade do solo (% em peso) no ponto de murcha permanente (PMP) a 1,5 MPa, e como variáveis independentes, as componentes lineares e quadráticas e a interação entre a umidade (% em peso) na capacidade de campo (CC) a 0,03 MPa e a disponibilidade total de água no solo (DTA), utilizando-se as análises físico-hídricas de 4.288 amos-

TABELA 3. Valores analíticos de características hídricas do solo (% em peso) submetidos a modelos matemáticos (M) de ajuste sequencial(1) e hiperbólico(2) para as tensões de 0,01, 0,03, 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 e 1,5 MPa, respectivamente, comparadas a curvas de retenção de água experimentais(3).

M	0,01	CC	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	PMP
1.	9,52	4,89	3,87	2,47	2,08	1,78	1,61	1,44
2.		4,89	2,83	2,49	2,27	2,05	1,90	1,82
3.	7,50	4,89	4,75	3,92	3,15	2,96	2,08	1,82
1.	15,28	10,18	8,79	7,06	6,06	5,36	5,06	4,76
2.		10,18	5,87	4,80	4,15	3,51	3,12	2,91
3.	16,99	10,18	8,73	5,32	3,96	3,08	3,00	2,91
1.	22,02	16,37	14,56	12,43	10,72	9,54	9,09	8,65
2.		16,37	13,08	11,58	10,57	9,52	8,82	8,45
3.	22,14	16,36	14,44	12,76	10,15	9,49	9,55	8,45
1.	26,42	20,42	18,33	15,94	13,77	12,28	11,73	11,19
2.		20,42	17,45	15,69	14,47	13,14	12,27	11,79
3.	26,20	20,42	18,59	15,66	13,26	12,55	12,26	11,79
1.	31,50	25,09	22,67	20,00	17,30	15,43	14,77	14,12
2.		25,09	21,68	19,19	17,39	15,45	14,17	13,49
3.	31,64	25,09	23,02	21,81	18,91	15,42	14,25	13,49
1.	35,33	28,61	25,95	23,05	19,94	17,81	17,06	16,33
2.		28,61	25,33	22,54	20,42	18,09	16,56	15,74
3.	35,62	28,61	26,25	22,97	20,26	17,38	15,92	15,74
1.	43,28	35,91	32,75	29,38	25,44	22,74	21,81	20,91
2.		35,91	32,69	29,16	26,19	22,83	20,61	19,42
3.	44,78	35,91	32,98	30,58	25,61	21,11	19,96	19,42
1.	46,99	39,32	35,92	32,34	28,01	25,04	24,03	23,05
2.		39,32	36,76	33,61	30,77	27,40	25,10	23,85
3.	47,82	39,32	37,00	34,00	31,00	27,39	25,80	23,85

tras de solos, representativas das áreas irrigáveis do trópico semi-árido (TSA).

No caso das três texturas estudadas, a técnica de superfície de resposta permitiu uma otimização das variáveis (CC, PMP e Dg), agrupando-se como resultado na variável DTA e formando um conjunto de seis classes.

As amplitudes de variação das DTA situaram-se dentro dos seguintes limites médios de água disponível: solos de textura grossa, de 3,51 a 8,42 m³/ha/cm; solos de textura média, de 7,46 a 17,01 m³/ha/cm; e solos de textura fina, de 11,71 a 23,28 m³/ha/cm de profundidade do solo. Estes limites de disponibilidade total de água (DTA), segun-

do Bernardo (1986), são similares aos utilizados pelo Serviço Nacional de Conservação de Solos dos Estados Unidos da América do Norte, para as mesmas texturas, cujas amplitudes variam em torno dos seguintes limites médios: textura grossa, de 4,0 a 8 m³/ha/cm; textura média, de 8,0 a 16,0 m³/ha/cm; e textura fina, de 12,0 a 24 m³/ha/cm (Baver 1973 e Hiell 1982).

Nas Figs. 8, 9 e 10 encontram-se especificadas somente as classes que podem ser usadas para fins de projeto e manejo de áreas irrigadas.

Os resultados da Fig. 8, para os solos de textura grossa mostram que somente cinco classes servem para fins de irrigação, e que estas agrupam-se entre

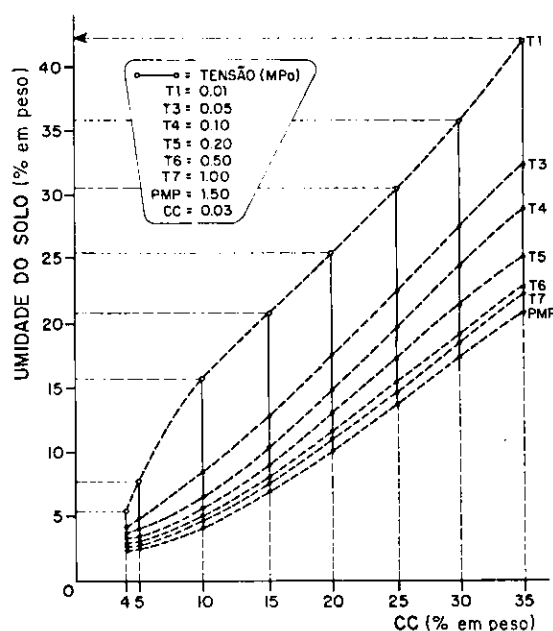
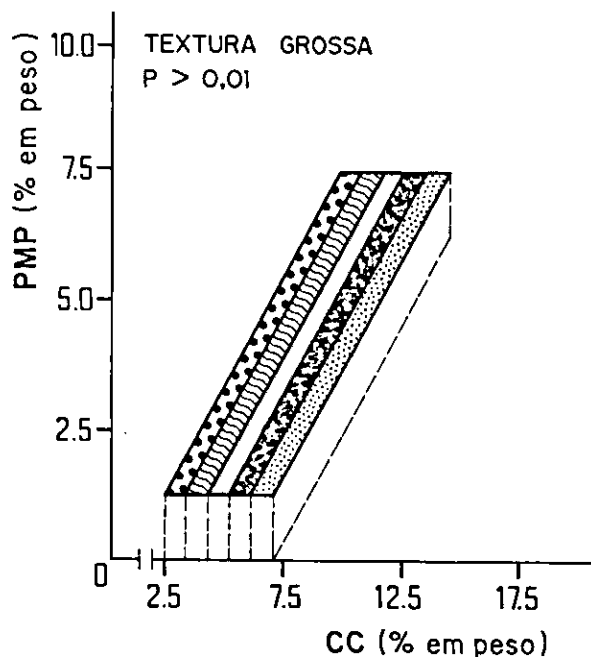


FIG. 7. Curvas simuladas de retenção de água no solo em função da umidade na capacidade de campo (CC) (0,03 MPa) e a umidade do solo em diferentes potenciais matriciais.

os valores de 4,0 e 8,42 m³/ha/cm. Na Fig. 8, a classe 6 tem uma amplitude de 3,51 a 4,0 m³/ha/cm; a classe 5, de 4,0 a 4,98 m³/ha/cm; a classe 4, de 4,98 a 5,97 m³/ha/cm; a classe 3, de 5,97 a 6,95 m³/ha/cm; a classe 2, de 6,95 a 7,93 m³/ha/cm; e a classe 1, de 7,93 a 8,42 m³/ha por cm do solo. As classes que mais representam as características físicas dos solos irrigáveis de textura grossa do TSA, para fins de irrigação, são as de número 5, 4 e 3, com DTA variando entre 4,0 e 6,95 m³/ha/cm.

Através da Fig. 9 correspondente aos solos de textura média, observa-se que só existem cinco principais classes hídricas com valores máximos e mínimos para a classe 6, de 7,46 a 8,42 m³/ha/cm; classe 5, de 8,42 a 10,34 m³/ha/cm; classe 4, de 10,34 a 12,36 m³/ha/cm; classe 3, de 12,26 a 14,19 m³/ha/cm; classe 2, de 14,19 a 16,20 m³/ha por cm do solo. As classes mais prováveis de uso em manejo de solo e água para os solos de textura média são as classes 4, 3 e 2, cujas amplitudes de DTA variaram de 10,34 a 16,20 m³/ha/cm.

Em relação aos solos de textura fina (Fig. 10) os valores máximos e mínimos das classes hídricas situaram-se dentro dos seguintes limites médios: classe 6, de 11,71 a 12,86 m³/ha/cm; classe 5, de 12,86 a



CLASSES HÍDRICAS

CLASSES	DTA	
	m ³ .ha ⁻¹ .cm ⁻¹ do solo	
6	3.51	4.00
5	4.00	4.98
4	4.98	5.97
3	5.97	6.95
2	6.95	7.93
1	7.93	8.42

FIG. 8. Classes hídricas em função da disponibilidade total de água no solo (DTA) para solos de textura grossa. Relação entre a umidade na capacidade de campo (CC) (0,03 MPa) e o ponto de murcha permanente (PMP) (1,5 MPa).

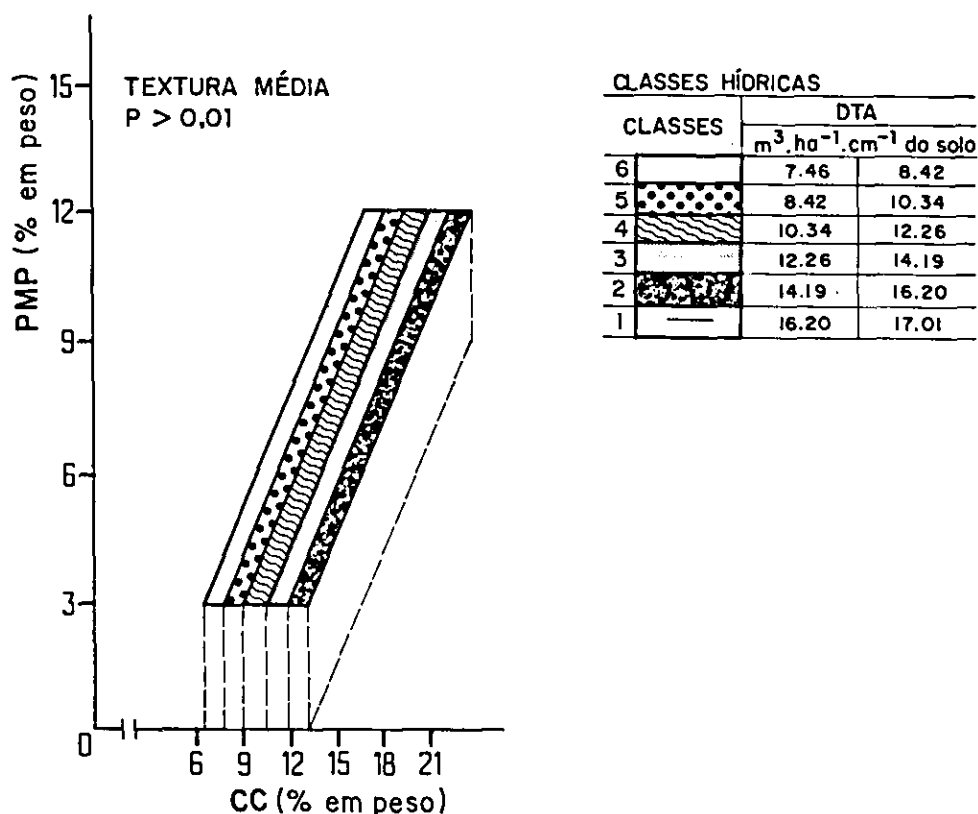


FIG. 9. Classes hídricas em função da disponibilidade total de água no solo (DTA) para solos de textura média. Relação entre a umidade na capacidade de campo (CC) (0,03 MPa) e no ponto de murcha permanente (PMP) (1,5 MPa).

15,18 m³/ha/cm; classe 4, de 15,18 a 17,49 m³/ha/cm; classe 3, de 17,49 a 19,81 m³/ha/cm; classe 2, de 19,81 a 22,12 m³/ha/cm; classe 1, de 22,12 a 23,28 m³/ha por cm do solo. As classes mais comuns, na região sob estudo para fins de irrigação, são as de número 4, 3, 2 e 1, cujas variações de DTA ocorrem entre 15,18 e 23,28 m³/ha/cm.

Pelos resultados obtidos, conclui-se que as técnicas de superfície de resposta permitem obter classes hídricas de água disponível no solo que podem ser estimadas com base na textura do solo, com significância superior a 99,9% de probabilidade ($P > 0,01$), em função da umidade no ponto de PMP e da umidade no ponto de CC. Estes resultados também possibilitam comparações com resultados obtidos por meio de outros métodos ou extrapolações, sem a necessidade de recorrer a cálculos, bem como a realização de mapeamentos exploratórios de áreas irrigáveis de agricultores que ainda não têm acesso às análises de laboratórios de solos, tanto em áreas irrigáveis como em áreas de agricultura dependente de chuva.

CONCLUSÕES

1. O teor de umidade do solo em capacidade de campo (CC) poderá ser determinado "in situ", para fins práticos de irrigação e manejo de áreas irrigáveis, em solos de textura grossa e média no trópico semi-árido brasileiro (TSA), através do método do álcool hidratado.

2. A umidade no ponto de murcha permanente (PMP), poderá ser conseguida a partir da umidade em CC, determinada "in situ" pelo método do álcool, com amplitudes de variação situando-se dentro dos seguintes limites médios de umidade: solos de textura grossa, de mais ou menos 1,5%; solos de textura média, de mais ou menos 2,25%; e solos de textura fina,

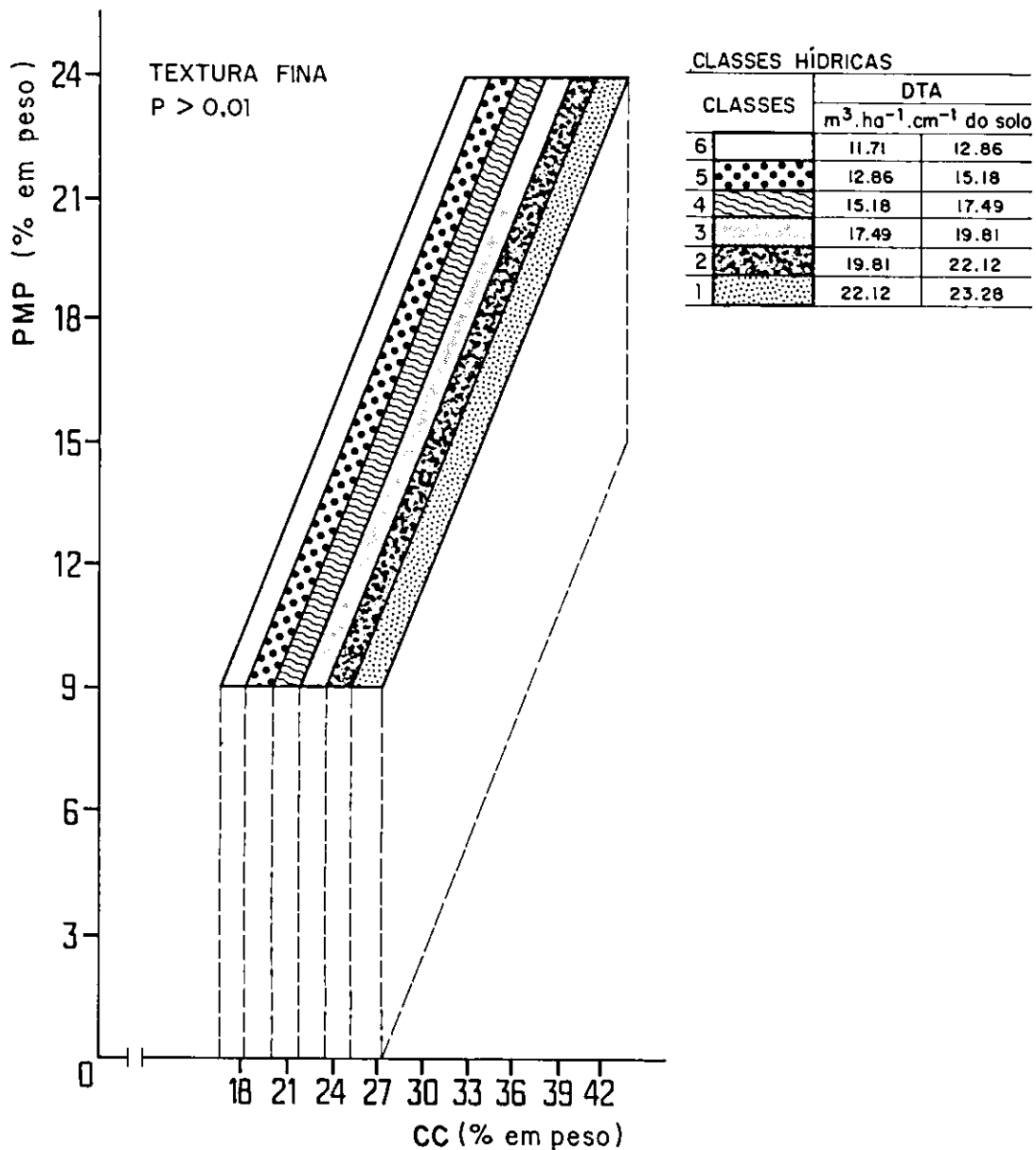


FIG. 10. Classes hídricas em função da disponibilidade total de água no solo (DTA) para solos de textura fina. Relação entre a umidade na capacidade de campo (CC) (0,03 MPa).

de mais ou menos 2,74%, para um limite de confiança de 99%.

3. As análises evidenciaram que as relações entre a umidade do solo determinada "in situ" (CC) (% em peso) e em laboratório a 0,03 MPa poderiam ser estimadas por classe textural (grossa (TG), média (TM) e fina (TF)), através das seguintes equações li-

neares: 1) $TG = 4,589 - 0,2514CC + 0,427CC^2$ ($r^2 = 0,965$); 2) $TM = -2,821 + 0,939CC + 0,0309CC^2$ ($r^2 = 0,85$); e 3) $TF = -4,073 + 1,718CC - 0,0113CC^2$ ($r^2 = 0,99$), dentro dos limites de variação de umidade do solo entre 5 e 13%, para TG; de 8 a 14%, para TM; e de 10 a 38% para os solos de textura fina.

4. É possível estimar os principais pontos de uma curva de retenção de água no solo, por meio de equações sequenciais, para fins práticos de trabalhos que envolvam as interações solo-água-planta, a partir da umidade em CC, principalmente nas áreas irrigadas onde os agricultores ainda não têm acesso aos laboratórios de solo.

5. As classes hídricas neste trabalho têm a vantagem de agrupar a disponibilidade total de água no solo (DTA) por textura (TG, TM e TF), para fins de irrigação, onde TG tem uma amplitude de 4,0 a 8,42 m³/ha/cm; TM de 7,46 a 16,20 m³/ha/cm; e TF de 11,71 a 23,28 m³/ha/cm do solo. As classes prováveis de uso em TG são as de 4,0 a 4,98 m³/ha/cm; e de 4,98 a 5,97 m³/ha/cm; de 5,97 a 6,95 m³/ha/cm, enquanto as de TM abrangem as classes de 10,34 a 12,26 m³/ha/cm; de 12,26 a 14,19 m³/ha/cm; e de 14,19 a 16,20 m³/ha/cm e todavia, os solos de textura fina TF agrupam-se de 15,18 a 17,49 m³/ha/cm; de 17,49 a 19,81 m³/ha/cm; 19,81 a 22,12 m³/ha/cm; e de 22,12 a 23,18 m³/ha/cm de profundidade do solo, as quais poderiam ser estimadas unicamente em função da umidade em CC.

REFERÊNCIAS

- AGUILERA, M. & MARTÍNEZ ELIZONDO, R. *Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera*. 2.ed. Chapingo, Universidad Autónoma Chapingo, 1980. 231p. il.
- ARRUDA, F.B.; ZULLO JUNIOR, J.; OLIVEIRA, J.B. de. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. *R. bras. Ci. solo*, Campinas, SP, 11:11-15, 1987.
- BAVER, L.D.; GARNER, W.H.; GARDNER, W.R. *Física de suelos*. México, Unión Tipografía Editorial Hispano-Americana, 1973. 529p. il.
- BERNARDO, S. *Manual de irrigação*. 4.ed. Viçosa, Imprensa Universitária, 1986. 488p. il.
- BRASIL. SUDENE. *Programa de Irrigação do Nordeste - PROINE 1986/1990*. Recife, PE, 1986. 307p.
- CAMARGO, M.N.; KLAMT, E.; KAUFFMAN, J.H. Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil. *B. Inf.*, 12(1):11-33, 1987.
- CAVAZZA, L.; COMEGNA, V.; LINSALATA, D. Correlation of field capacity between open field and laboratory determinations. In: HADAS, A.; SWARTZENDRUBER, D.; RIJTEMA, P.E.; FUCHS, M.; YARON, B. ed. *Physical aspects of soil water and salts in ecosystems*. Berlin, Springer-Verlag, 1973. Cap. 8, p.187-93. (Ecological Studies. Analysis and Synthesis, 4).
- FERNANDEZ MEDINA, B.; OLIVEIRA JUNIOR, R.C. de. Relações entre capacidade de campo determinada "in situ" e em laboratório em latossolo amarelo muito argiloso. *R. bras. Ci. solo*, Campinas, SP, 11(2):91-5, 1987.
- HILLEL, D. *Introduction to soil Physics*. Orlando, Academic Press, 364p. il. 1982.
- HUSSEIN, J.A. Review of methods for determining available water capacities of soils and description of an improved method for estimating field capacity. *Zimbabwe J. Agric. Res.*, 21(1):73-87, 1983.
- KALMAN, R.E. & MARTÍNEZ, J. eds. *Computer applications in food production and agricultural engineering: proceedings of the IEIP IC 5. Working Conference*, Amsterdam, North-Holland, 1982. 334p.
- LINSLEY JUNIOR, R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. *Hydrology for engineers*. 3.ed. New York, McGraw-Hill, 1982. 508p. il. (McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering).
- PRUSKI, F.F.; LOURENÇO, A.J.; OLIVEIRA, M.J.C. Estudo comparativo entre métodos para a determinação da umidade do solo. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 7, Brasília, DF, 1986. Anais. Brasília, ABID, 1986. v.1, p.169-83.
- RICHARDS, L.A. Physical condition of water in soil. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. Part. 1, p.128-51. (Agronomy P).
- REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas, São Paulo, Manoel, 1987. 188p. il.
- VIEIRA, S.R. & CASTRO, O.M. de. Determinação, em laboratório, de curvas de retenção de água com tensiômetros. *R. bras. Ci. solo*, Campinas, SP, 11(2):87-90. 1987.
- WEAVER, T.F. & KELLER, J. La irrigación de África, la evaluación y la aplicación de nuevas técnicas de irrigación enfretan serios problemas. *Desarrollo Nacional*, 32(6):16-20, ago. 1985.