ESTIMATIVA DA MACRO E DA MICROPOROSIDADE ATRAVÉS DA
GRANULOMETRIA E DENSIDADES DE PARTÍCULAS E DO SOLO

ALVARO DE MENDONCA THURLER
Engenheiro Agrônomo

Orientador Dr. RUBISMAR STOLF

Dissertação apresentada à Escola
Superior de Agricultura "Luiz de
Queiroz", da Universidade de São
Paulo, para obtenção do título
de Mestre em Agronomia, Área de
Concentração : Solos e Nutrição
de Plantas.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
MAIO - 1989

T537e

Thurler, Alvaro de Mendonça.

Estimativa da macro e da microporosidade
através da granulometria e densidades de par-
tículas e do solo. Piracicaba, 1989.

66 p.

Diss. (Mestre) - ESALQ

Bibliografia.

1. Solo - Densidade. 2. Solo - Física 3.
Solo - Granulometria. 4. Solo - Porosidade -
Estimativa. I. Escola Superior de Agricultu-
ra Luiz de Queiroz, Piracicaba.

CDD 631.432

ESTIMATIVA DA MACRO E DA MICROPOROSIDADE ATRAVÉS DA
GRANULOMETRIA E DENSIDADES DE PARTÍCULAS E DO SOLO

ALVARO DE MENDONÇA THURLER

Aprovada em 03/08/89

Comissão Julgadora

Dr. Rubismar Stolf

PLANALSUCAR

Prof. Dr. Zilmar Ziller Marcos

ESALQ/USP

Prof. Dr. Oswaldo Pereira Godoy

ESALQ/USP

UBISMAR STOLF

ORIENTADOR

Aos meus pais Gentil (in memoriam) e Ayr,
ao meu irmão Eduardo, à esposa Tânia e
aos filhos Leandro, Gustavo e Guilherme,
dedico este trabalho em reconhecimento
a tudo que representam para mim.

AGRADECIMENTOS

- . Ao Doutor Rubismar Stolf pela amizade e irrestrita orientação, o que tornou possível o desenvolvimento deste trabalho.
- . Ao Professor Doutor Zilmar Ziller Marcos por sua dedicação e pelo estímulo provocado no decorrer do Curso.
- . Ao Departamento de Solos, Geologia e Fertilizantes pela utilização do Laboratório de Física do Solo, onde foi iniciado este estudo.
- . Ao Engenheiro Agrônomo Hugo de Souza Dias por sua contribuição na classificação dos solos utilizados neste estudo.
- . À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" e ao IAA/PLANALSUCAR pela oportunidade de realização deste Curso.
- . Aos Técnicos Antônio Zaia e Divino Rodrigues Moreira e ao Engenheiro Agrônomo Miguel Maniero pela colaboração prestada nas análises químicas e físicas.
- . Às demais pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

	<u>página</u>
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMO	x
SUMMARY	xii
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DE LITERATURA	03
2.1. Compactação de solo	03
2.2. Porosidade, granulometria e retenção de água	07
2.3. Porosidade e aeração	10
2.4. Porosidade e infiltração	13
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1. Obtenção dos 3 níveis de compactação	19
3.2. Análises físicas	20
3.2.1. Análises granulométricas	20
3.2.2. Densidade das partículas	20

3.2.3. Microporosidade	20
3.2.4. Densidade do solo	21
3.2.5. Volume total de poros	22
3.2.6. Macroporosidade	22
3.3. Estabelecimento de equações para estimativa de macro e microporosidade	22
3.4. Simbologia	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1. Introdução da granulometria nas equações ..	28
4.2. Estabelecimento das equações	33
4.3. Comparação de dados de literatura com dados estimados pelas equações	42
4.4. Estimativas dos níveis críticos de densidade do solo	42
4.5. Cálculo da DS em função das equações que es- timam a macro e microporosidade	47
4.6. Considerações gerais	51
5. CONCLUSÕES	55
6. LITERATURA CITADA	58

LISTA DE TABELAS

	<u>página</u>
Tabela 1 - Caracterização das amostras de terra utilizadas quanto ao tipo de solo, a nível de grande grupo, e profundidade da coleta ...	17
Tabela 2 - Características químicas das amostras de terra utilizadas	18
Tabela 3 - Granulometria das amostras, determinação da microporosidade e cálculo da porosidade total e macroporosidade em função da DS e DP	25
Tabela 4 - Equações lineares com uma variável independente e respectivos erro padrão e coeficiente de correlação	32
Tabela 5 - Equações lineares com duas variáveis independentes e respectivos erro-padrão e coeficiente de determinação	34
Tabela 6 - Comparação entre os teores de argila e limo determinados com os estimados pela equação 01	35

Tabela 7 - Valores de densidade das partículas e matéria orgânica determinados e estimados ..	37
Tabela 8 - Valores de porosidade total determinados e estimados	38
Tabela 9 - Valores de macro e microporosidade % volume determinados e estimados	40
Tabela 10 - Estimativa da macroporosidade em função do teor de areia e densidade do solo, utilizando-se a equação nº 24	41
Tabela 11 - Dados de micro e macroporosidade obtidos por FREIRE (1975), em Latossolo Roxo Distrófico, e os estimados através de equações	43
Tabela 12 - Dados de micro e macroporosidade obtidos por PRIMAVESI et alii (1984), em Latossolo Roxo e Podzólico Vermelho Amarelo, e os estimados pelas equações	44
Tabela 13 - Dados de micro e macroporosidade obtidos por SCARDUA (1972), em Regosol e Terra Roxa Estruturada, e os estimados através de equações	45

Tabela 14 - Cálculo da densidade do solo para obter-se macroporosidade igual a 10 %, utilizando-se as equações que estimam a macro e microporosidade	49
--	----

Tabela 15 - Cálculo da densidade do solo para obter-se macroporosidade igual a 15 %, utilizando-se as equações que estimam a macro e microporosidade	50
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Macroporosidade % volume em função do teor de areia para os 3 níveis de compactação .	26
--	----

Figura 2 - Microporosidade % volume em função do teor de areia para os 3 níveis de compactação .	26
--	----

Figura 3 - Macroporosidade % peso em função do teor de areia para os 3 níveis de compactação	27
---	----

Figura 4 - Microporosidade % peso em função do teor de areia para os 3 níveis de compactação	27
---	----

Figura 5 - Determinação da densidade do solo em função do teor de areia e densidade das partículas, para obter-se uma macroporosidade igual a 10 %	52
---	----

Figura 6 - Determinação da densidade do solo em função do teor de areia e densidade das partículas, para obter-se uma macroporosidade igual a 15 %	53
---	----

ESTIMATIVA DA MACRO E DA MICROPOROSIDADE ATRAVÉS DA GRANULOMETRIA E DENSIDADES DE PARTÍCULAS E DO SOLO

Autor : ALVARO DE MENDONÇA THURLER

Orientador : Dr. RUBISMAR STOLF

RESUMO

Neste estudo foram utilizadas 10 amostras de terra com diâmetro máximo de partículas de 2 mm e que apresentavam uma grande variabilidade granulométrica. Estas amostras foram compactadas em três níveis e submetidas a uma tensão de 0,006 MPA (considerada como limite entre a macro e microporosidade), por secagem de amostras saturadas.

A macroporosidade foi calculada pela diferença entre o volume total de poros e a microporosidade.

O objetivo deste trabalho foi estabelecer equações para estimar a macro e microporosidade. As equações foram obtidas através de regressão múltipla, pelo método dos mínimos quadrados, utilizando-se a granulometria, a densidade do solo e a porosidade total como variáveis independentes.

A macro e microporosidade podem ser estimadas através das seguintes equações :

$$\text{MICRO } \% = 60,57 - 0,313 \text{ A}\% - 0,239 \text{ PT}\%/\text{DS}$$

$$\text{MACRO } \% = -31,40 + 0,265 \text{ A}\% + 0,858 \text{ PT}\%/\text{DS}$$

$$\text{MICRO } \% = 68,09 - 0,298 \text{ A}\% - 23,66/\text{DS}$$

$$\text{MACRO } \% = -58,44 + 0,214 \text{ A}\% + 85,02/\text{DS}$$

Também foram feitas correlações entre os teores de areia, limo e argila; e, ainda, entre os teores de areia e matéria orgânica e densidade das partículas.

Utilizando-se o conceito do limite crítico de macroporos, abaixo do qual uma dada cultura apresentaria o seu desenvolvimento prejudicado, estabeleceu-se o "limite crítico de densidade do solo", acima do qual haveria esse efeito, empregando-se as equações que estimam a macro e microporosidade.

Considerando o limite mínimo de macroporos adequado ao desenvolvimento de uma determinada cultura igual a 10% (limite observado para a cana-de-açúcar), pode-se estimar o limite crítico de densidade do solo através das seguintes equações :

$$\text{DS} = \frac{85,8 \text{ DP}}{85,8 + (41,4 - 0,265 \text{ A}\%) \text{ DP}}$$

$$\text{DS} = \frac{85,02}{68,44 - 0,214 \text{ A}\%}$$

$$\text{DS} = \frac{(0,313\text{A}\% + 29,43)\text{DP} - 23,9 + \sqrt{[(0,313\text{A}\% + 29,43)\text{DP} - 23,9]^2 + 9560 \text{ DP}}}{200}$$

ESTIMATE OF MACRO AND MICROPOROSITY THROUGH GRANULOMETRY AND SOIL AND PARTICLE DENSITIES

Author : ALVARO DE MENDONÇA THURLER

Adviser : Dr. RUBISMAR STOLF

SUMMARY

Ten soil samples, which contained particles with a maximum diameter of 2 millimeters and showed a great granulometric variability, were used in this study. These samples were compacted on three levels and submitted to a 0,006 MPA tension (considered as a limit between the macro and microporosity), through drying of saturated samples.

Macroporosity was estimated by the difference between the total volume of pores and the microporosity.

The aim of this study was to set up equations to estimate macro and microporosity. The equations were gotten through multiple regression by the square minimum method, using granulometry, soil density and total porosity as independent variables.

Macro and microporosity may be estimated through the following equations :

$$\text{MICRO \%} = 60,57 - 0,313 \text{ S\%} - 0,239 \text{ TP\%/SD}$$

$$\text{MACRO \%} = -31,40 + 0,265 \text{ S\%} + 0,858 \text{ TP\%/SD}$$

$$\text{MICRO \%} = 68,09 - 0,298 \text{ S\%} - 23,66/\text{SD}$$

$$\text{MACRO \%} = -58,44 + 0,214 \text{ S\%} + 85,02/\text{SD}$$

Correlations between sand contents, silt and clay were also carried out; and still between sand contents and organic matter and particle density

Utilizing the macropore critical limit concept, below which an especific crop would show its development injured, it was established the "critical limit of soil density", above which there would be this effect, using the equations that estimate macro and microporosity.

Regarding the suitable macropore minimum limit to the development of a definite crop as being 10 % (the limit which is noticed for sugar cane), the critical limit of soil density may be estimated through the following equations :

$$\text{SD} = \frac{85,8 \text{ PD}}{85,8 + (41,4 - 0,265 \text{ S\%}) \text{ PD}}$$

$$\text{SD} = \frac{85,02}{68,44 - 0,214 \text{ S\%}}$$

$$\text{SD} = \frac{(0,313\text{S\%} + 29,43)\text{PD} - 23,9 + \sqrt{[(0,313 \text{ S\%} + 29,43)\text{PD} - 23,9]^2 + 9560 \text{ PD}}}{200}$$

1. INTRODUÇÃO

O objetivo básico do preparo do solo é o restabelecimento de uma porosidade adequada, que tem influência direta sobre a aeração e permeabilidade à água, permitindo uma maior exploração do solo pelo sistema radicular da planta, com consequentes reflexos no seu desenvolvimento e produtividade.

É fundamental estabelecer-se a melhor forma de avaliar a necessidade do preparo do solo. A densidade do solo tem sido a mais utilizada. Entretanto como, para uma dada densidade do solo, a porosidade e a distribuição do tamanho de poros variam com diversos fatores, tais como a densidade das partículas, granulometria e estrutura, a macro e microporosidade têm sido consideradas parâmetros auxiliares mais consistentes na definição do manejo do solo, pois os mesmos correlacionam-se melhor com a aeração, permeabilidade e armazenamento da água.

Uma dificuldade para a adoção generalizada da densidade do solo é que as determinações dos parâmetros macro e microporosidade exigem análises complementares de laboratório nem sempre disponíveis ao usuário. Nesse caso, sua

estimativa, através de dados conhecidos, desde que utilizada com cautela, aumentaria o universo de informações sobre o sistema.

O objetivo do presente estudo é estabelecer equações para que sejam estimadas a macro e microporosidade, através da granulometria e densidades de partículas e do solo. Estas estimativas foram baseadas nas seguintes premissas :

- a) Para uma dada granulometria, o volume de macroporos aumenta e o de microporos diminui, com o aumento de volume de poros.
- b) Para um dado volume total de poros, o volume de macroporos aumenta e o volume de microporos diminui, com o aumento do diâmetro das partículas do solo (granulometria).

A partir destas estimativas, considerando os limites mínimos de macroporos adequados ao desenvolvimento de uma dada planta, através de informações já existentes na literatura, estimar a densidade de solo limite para indicação de um manejo que restabeleça sua porosidade adequada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Compactação do solo

A compactação do solo ocorre devido a uma mudança no volume do solo, causada por forças mecânicas ou naturais (HARRIS, 1971). Para o autor, o solo deve ser descrito em termos de um esqueleto de partículas sólidas de dimensões variáveis, que contêm espaços porosos, que podem ser ocupados por substâncias líquidas e gasosas. Submetendo-se o solo a uma carga capaz de causar uma mudança no seu volume, quatro tipos de ocorrência se verificarão : 1) uma compressão nas partículas sólidas; 2) uma compressão dos líquidos e gases contidos nos poros; 3) uma mudança nos teores de líquidos e gases nos poros; 4) um rearranjo das partículas do solo.

Segundo GROWMAN (1975), dá-se o nome de compactidade ao arranjo ou agrupamento cerrado das partículas que um solo apresenta. O autor denomina camadas adensadas àquelas em que a compactidade é devida a processos pedogenéticos, reservando o termo camada compactada àquela em que sua compactidade é devida ao manejo do solo, o que está

de acordo com GILL (1959), que define a compactação do solo como resultado do movimento de aproximação das partículas por forças externas.

A literatura sobre compactação do solo, conforme CAMARGO (1983), afirma que o rearranjo de partículas primárias e agregadas por implementos agrícolas e a compressão causada pelo tráfego de veículos podem ser considerados as maiores causas da compactação do solo. Este fato é agravado, uma vez que a umidade ideal para execução das operações de preparo do solo, segundo WEAVER (1950), é semelhante à umidade que proporciona a máxima compactação.

A água exerce um papel importante no processo de compactação, pois atua como lubrificante, facilitando a aproximação das partículas. Isto, porém, ocorre até um limite crítico, a partir do qual o efeito é invertido, pois a água, ocupando o lugar dos poros, impede a aproximação das partículas.

Estudando a variação da densidade do solo em função do grau de umidade, quando se aplica uma força constante, PROCTOR (1933) verificou que a densidade aumentava com o aumento da umidade até um valor máximo, para, em seguida, decrescer. Observou ainda que os valores da densidade do solo variavam de acordo com as características do solo, principalmente a textura.

VOMOCIL e FLOCKER (1961) verificaram que, quando o solo é compactado, a distribuição do tamanho dos

poros geralmente sofre uma mudança relativa maior do que a densidade média ou a porosidade total. Em função disto, esta variável pode servir como indicador sensível de compactação.

VIEIRA (1985) observou que uma diminuição da macroporosidade ocasiona um aumento na microporosidade, fato constatado por GHILDYAL e SATYANARAYAMA (1965), que, estudando solos de textura arenosa, barro-arenosa e argilosa, submetidos a compactação, encontravam um aumento dos microporos à custa da redução dos macroporos.

JAMIESON (1956) verificou que, sob uma mesma tensão, o teor de água por volume de solo, aumentou ao máximo com a densidade média e, depois, diminuiu.

YANG e DE JONG (1971) verificaram que o teor de água por peso acima de 0,1 bar não foi afetado pelas mudanças de densidade média. Com sucções mais baixas, o teor de água aumentava quando a densidade média diminuía, porque o volume de poros aumentava.

Como a porosidade é uma propriedade diretamente relacionada com a compactação do solo, segundo CAMARGO (1983), esta influencia na aeração do solo causando uma diminuição na porosidade e redução na difusão de oxigênio. Efeitos prejudiciais da compactação na aeração do solo foram observados por SWARTZ e KARDOS (1963) e TAYLOR e BURNETT (1963).

BARLEY (1962) obteve os seguintes resultados

a respeito do desenvolvimento de raízes : 1) a baixos valores de resistência à penetração, a concentração de oxigênio determina o grau de crescimento das raízes; 2) as raízes não se desenvolvem em altos níveis de impedimento mecânico, qualquer que seja o nível de oxigênio; 3) a uma dada concentração de oxigênio, o desenvolvimento das raízes cresce em proporção logarítmica com o aumento da resistência à penetração.

VEIHMAYER e HENDRICKSON (1948) submeteram à compactação, em condições de laboratório, seis tipos de solo contendo diferentes composições granulométricas, a fim de testarem a capacidade de penetração das raízes de girassol. Verificaram que os limites de densidade, acima dos quais as raízes não penetraram, foram cerca de $1,75 \text{ g.cm}^{-3}$, para os solos arenosos, e variavam em torno de $1,46$ a $1,63 \text{ g.cm}^{-3}$, para os argilosos.

A penetração das raízes da plântula do algodoeiro em solos compactados a diferentes densidades foi afetada, segundo TACKETT e PERSON (1964), por diferentes níveis de oxigênio. Densidades maiores que $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ causaram grande diminuição na penetração. Com densidades menores, o crescimento das raízes aumentou rapidamente com o aumento da concentração de oxigênio e chegou ao máximo com 10 % de oxigênio, evidenciando que o fator mais importante neste caso foi a aeração.

Segundo STOLF (1987), a densidade do solo

tem sido o parâmetro mais utilizado para estudos de compactação, porém não permite comparações entre solos diferentes, principalmente no tocante à granulometria. Já a quantidade de macroporos possibilita uma comparação adequada e permite o estabelecimento de padrões para descompactação.

Neste estudo a macroporosidade será considerada como fator indicativo de compactação do solo.

2.2. Porosidade, granulometria e retenção de água

A divisão do volume total de poros em "porosidade capilar" associado com a retenção de água e a "porosidade não capilar", que armazena e conduz gases, parece ser, segundo VOMOCIL e FLOCKER (1961), o método mais simples para caracterizar o sistema poroso do solo.

De acordo com BUCKMAN e BRADY (1976), ao examinar-se curvas características da umidade do solo, verifica-se que elas variam especificamente com a textura. Os solos de textura mais fina retêm maior porcentagem de água, ao longo de toda a faixa de energia. Tal condição é prevista por possuírem maior porcentagem de matéria coloidal, maior espaço poroso e superfície adsortiva muito maior.

Segundo ALI et alii, 1966, citado por FREIRE (1975), a retenção de água é função da quantidade e natureza da argila e do teor de matéria orgânica. Estes auto-

res encontraram correlações altamente significativas entre os teores de argila e limo e a água retida a 1/10, 1/3 e 15 atm.

Correlações negativas entre água retida a 1/3 atm e areia grossa foram encontradas por SALTER e WILLIAMS (1969). A retenção a 1/3 e 15 atm foi correlacionada com o teor de argila.

OLIVEIRA e MELO (1971) verificaram que existe uma estreita correlação entre a umidade equivalente e a microporosidade. O emprego da equação $Y = 11,96 + 0,67x$ corrige o valor da umidade equivalente, transformando-a em microporosidade, sendo que este valor poderá representar o limite máximo de água disponível no solo.

A quantidade de água retida pelo solo depende principalmente da quantidade e natureza da fração argila e do seu teor de matéria orgânica (GROHMANN e MEDINA, 1962). No solo Terra Roxa legítima de mata, a maior retenção foi atribuída, por estes autores, à matéria orgânica, cujos valores variaram de 6,8 a 0,8%. Em Terra Roxa intensamente cultivada, verificou-se uma menor retenção de água nas camadas superiores. Esta menor retenção foi mais influenciada pela variação da textura do que pelos teores da matéria orgânica, que são sempre baixos e pouco variáveis.

REEVE et alii (1973), analisando 158 solos, encontraram um coeficiente de correlação entre o teor de água retida a uma tensão de 0,005 MPA e o teor de areia

(60 - 2000 μm) de -0,88, no horizonte A, e -0,89, no horizonte B.

ARRUDA et alii (1987), utilizando 218 amostras provenientes dos horizontes A e B, de terras altas de vários locais paulistas, encontraram um coeficiente de correlação de 0,882 entre o teor de água retido a 0,03 MPA e o teor de limo + argila ($\leq 20 \mu\text{m}$).

Segundo RICHARDS e WADLEIGH (1952), a sucção de água do poro, na qual a drenagem virtualmente cessa e cujo nível de teor de água é chamado "capacidade de campo", varia com a distribuição do tamanho da partícula e a estrutura do solo e está geralmente entre 75 e 200 cm de coluna de água.

MARCOS (1971) sugere, para determinação de "capacidade de campo", submeter as amostras de terra a sucções de 0,06 atmosferas (tensão de uma coluna de água de 60 cm), em substituição à tensão de um terço de atmosfera.

A influência da granulometria na retenção de água e conseqüentemente sobre a macro e microporosidade dos solos torna a utilização desta característica imprescindível, quando se pretende obter a macro e microporosidade através de estimativas.

2.3. Porosidade e aeração

A renovação do ar do solo, segundo BAVER et alii (1973), se efetua por difusão e por fluxo de massa, resultado de fatores meteorológicos : variação de temperatura do solo, variação na pressão barométrica, ação do vento e alteração no espaço de poros ocupado pelo ar, devido à entrada de água da chuva ou irrigação.

A composição do ar do solo depende, em grande parte, da quantidade de "espaço de ar disponível", BUCKMAN e BRADY (1976). Nos solos com drenagem insuficiente, elevada proporção dos espaços porosos permanece cheia de água, dificultando a aeração destes solos.

OLIVEIRA e MELO (1970) observaram que a diminuição da aeração, que ocorre no horizonte B2 da unidade de solo Itapirema em PE, tem como fator de maior influência, o aumento do teor de argila.

Conforme BUCKMAN e BRADY (1976), solos de textura fina possibilitam movimentação lenta de gases e água, apesar de grande quantidade de espaços porosos. A aeração no subsolo é frequentemente inadequada para assegurar o desenvolvimento satisfatório das raízes e da atividade microbiana recomendável.

BALL (1981), analisando um solo barro-silto-so, verificou que o volume de poros com raio maior que 75 μm , quando não arado, foi 5 %, cerca de 1/3 do volume quando a-

rado. A difusividade relativa no solo não arado foi cerca de $1/5$ da observada no solo arado.

Realizando experimento em casa de vegetação, BERTRAND e KOHNKE (1957) observaram um menor crescimento do milho quando a subsuperfície do solo foi compactada. Concluíram que, se a taxa de difusão de oxigênio no solo caísse para menos que 0,16 da ocorrida no ar, o desenvolvimento da planta seria retardado. Sendo a difusão função da porosidade livre de água, pode ser influenciada pela compactação do solo ou mudanças no teor de água no solo.

Uma taxa de difusão de oxigênio de 0,111 a 0,062 foi sugerida por TAYLOR (1950) como níveis de aeração a partir dos quais as plantas começam a sofrer prejuízos. Ele observou que o espaço de ar, correspondente a esta taxa de difusão, variou de acordo com o meio e ficou na faixa de 10 a 20 %.

BAVER e FARNSWORTH (1940), estudando a relação entre porosidade não capilar e a produção de beterraba açucareira, verificaram que os rendimentos aumentavam rapidamente com o aumento da aeração. O rendimento máximo foi atingido com uma porosidade não capilar de 10 %. Concluíram, também, que a baixa aeração e o aumento de resistência do solo causaram uma queda na qualidade da beterraba.

De acordo com BAVAR et alii (1973), a porosidade do solo varia com o tamanho das partículas e o estado de agregação. A porosidade total não é tão interessante

como a distribuição de tamanho dos poros, em especial dos poros maiores, que são os responsáveis pela aeração do solo. Para estes autores, uma porosidade de aeração menor que 10 % restringe a proliferação das raízes.

Segundo VOMOCIL e FLOCKER (1961), o crescimento da planta e a produtividade declinam rapidamente quando a porosidade livre de água na capacidade de campo é reduzida a níveis críticos. Concluíram que a porosidade livre de água entre 10 e 15 % é adequada para um grande número de culturas.

SCARSBROOK et alii (1952), citados por ROBINSON (1964), encontraram, especificamente para a cana-de-açúcar, que uma variação de 9 a 10 % de porosidade livre de água é a adequada.

ROBINSON (1964), conduzindo experimento em lisímetro, onde o volume de ar foi controlado através do lençol freático, concluiu que uma variação entre 9,2 e 12,2 % permitiu um funcionamento normal das raízes de cana-de-açúcar.

Neste item podemos observar a influência da aeração no desenvolvimento de algumas culturas e a relação direta entre a macroporosidade e a aeração.

2.4. Porosidade e infiltração

CAMARGO (1983) citou que o volume de água que flui por um tubo na unidade de tempo é proporcional à quarta potência do raio. Portanto, como a compactação diminui a quantidade de poros grandes, ela terá uma influência muito grande na transmissão da água em solo saturado. A taxa de infiltração em solos compactados também é muito diminuída e esta condição pode causar uma aeração deficiente e aumento do escoamento superficial da água.

COLETI e DEMATTÊ (1982) observaram, em um Latossolo Vermelho Escuro, uma diminuição na condutividade hidráulica com aumento de densidade do solo. Consideraram que valores de D_s entre 1,3 e 1,4 g/cm³ podem ser considerados como satisfatórios para estes solos.

BENDIXEN et alii (1948) verificaram que a permeabilidade do solo à água correlacionou-se bem com a porosidade livre de água, medida após sucção correspondente a 60 cm de coluna de água, durante uma hora.

GOEDERT e BEATTY (1971) verificaram que a baixa porosidade é um dos fatores responsáveis pela pouca permeabilidade e pela má relação água-ar, nos grumossolos do Sudoeste do Rio Grande do Sul.

WINKLER e GOEDERT (1972), estudando as características hídricas dos solos podzolizados, planosos e gleizados de Pelotas, RS, encontraram boa relação entre a

textura e a retenção de água. Concluíram, também, que há relação entre o tamanho dos poros e a drenagem natural, nas diversas camadas dos solos.

MOURA FILHO e BUAL (1972) compararam os efeitos de 15 anos de cultivos anuais em um Eutrustrox e observaram que as taxas de infiltração baixaram de 82 para 12 cm.h^{-1} com cultivos intensivos. A diminuição da infiltração estava associada com uma nítida diminuição nos poros maiores de 0,05 mm de diâmetro (macroporos), tanto no horizonte A como no B. A diminuição da porosidade foi atribuída, pelos autores, à compactação produzida por máquinas pesadas e ao movimento da argila dispersa em água.

BACHE et alii (1981), estudando doze séries de solos escoceses, classificaram o subsolo em quatro níveis de permeabilidade baseada na porosidade livre de água, utilizando uma coluna de 50 cm de água como sucção : baixa $\leq 6,4\%$; moderada de 6,5 a 12,9 % ; alta de 13,0 a 19,9 % e muito alta $\geq 20\%$.

PRIMAVESI et alii (1984), procurando selecionar parâmetros básicos mais adequados para estudar o efeito da compactação de amostras de solo sobre a produção de matéria seca vegetal do feijoeiro, verificaram que os parâmetros físicos como densidade de solo, condutividade hidráulica saturada e resistência mecânica à penetração de penetrôgrafo, não foram adequados para estudos envolvendo solos diferentes, ou mesmo horizontes diferentes. Segundo

esses autores, a porcentagem de poros de aeração foi o indicador mais adequado, provavelmente por ser uma propriedade do solo e ser menos afetada por fatores externos.

Nos diversos tópicos podemos observar a influência da macroporosidade e granulometria sobre diversas propriedades do solo, como aeração, retenção de água e infiltração, que são básicas para um melhor conhecimento do potencial dos solos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para atender o objetivo de se obter uma ampla variação nos teores de areia, limo e argila, realizou-se um levantamento no livro de registro de análises granulométricas do laboratório da Coordenadoria Regional Sul, do IAA-PLANALSUCAR, em Araras (SP), escolhendo-se 10 amostras de solos de origem conhecida, caracterizadas a nível de grande grupo. A tabela 1 contém as amostras selecionadas.

Como caracterização complementar, foram realizadas análises químicas, segundo metodologia adotada pelo IAA-PLANALSUCAR, descrita em RODELLA (1983), cujos resultados constam da tabela 2.

A metodologia empregada foi dirigida no sentido de :

- a) Em cada amostra de terra gerar, em laboratório, três níveis de compactação, cujo intervalo de variação englobasse a maioria das situações encontradas na prática.
- b) Em cada combinação (granulometria, compactação), realizar medidas para obtenção da densidade do solo, bem como da macro e microporosidade.
- c) Estabelecer equações para estimar a macro e microporosi-

Tabela 1 - Caracterização das amostras de terra utilizadas quanto ao tipo de solo, a nível de grande grupo, e profundidade da coleta.

AMOSTRAS	SOLO	PROFUNDIDADE (cm)
01	LATOSSOL VERMELHO AMARELO	5 - 20
02	PODZÓLICO VERMELHO AMARELO	5 - 15
03	LATOSSOL VERMELHO ESCURO	40 - 80
04	PODZÓLICO VERMELHO AMARELO	5 - 15
05	LATOSSOL ROXO	15 - 35
06	TERRA ROXA ESTRUTURADA	5 - 15
07	TERRA ROXA ESTRUTURADA	10 - 25
08	TERRA ROXA ESTRUTURADA	0 - 15
09	LATOSSOL ROXO	0 - 20
10	LATOSSOL ROXO	5 - 25

Tabela 2 - Características químicas das amostras de terra utilizadas

AMOSTRA	pH H ₂ O	C %	PO ₄ ⁻³	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺² eq.mg/100	Al ⁺³	H ⁺ cm ³	Na ⁺	S	T	V %
01	4,8	0,72	0,12	0,23	0,8	0,1	0,4	2,6	0,03	1,16	4,16	27,9
02	5,1	0,77	0,08	0,04	1,2	0,2	0,5	3,8	0,06	1,50	5,80	25,9
03	5,5	0,72	0,12	0,03	2,5	1,2	0,2	4,4	0,02	3,75	8,35	44,9
04	6,1	1,28	0,47	0,12	3,8	0,7	0,0	2,9	0,08	4,70	7,60	61,8
05	6,5	1,28	0,44	0,05	3,4	1,9	0,0	1,9	0,04	5,39	7,29	73,9
06	5,8	0,93	0,68	0,52	5,2	0,8	0,0	2,1	0,08	6,60	8,70	75,9
07	6,3	1,35	0,55	0,09	3,4	1,8	0,0	2,2	0,07	5,36	7,56	70,9
08	5,7	1,48	0,35	0,35	4,9	1,9	0,2	4,4	0,09	7,24	11,84	61,1
09	5,3	1,75	0,67	0,21	3,1	1,0	0,2	4,7	0,08	4,39	9,29	47,3
10	4,7	1,54	0,28	0,18	1,7	0,8	0,9	6,3	0,06	2,74	9,94	27,6

dade, através da granulometria e densidades (do solo e da partícula).

As amostras de terra utilizadas foram previamente secadas ao ar e passadas em peneira de 2 mm (TFSA).

3.1. Obtenção dos três níveis de compactação

De cada amostra retirou-se uma quantidade de terra suficiente para o preenchimento de um anel volumétrico de $54,29 \text{ cm}^3$ (diâmetro : 4,80 cm; altura : 3,00 cm).

Os três níveis (N) de compactação foram obtidos no mesmo cilindro, pelo seguinte processo :

N1 - preenchimento do anel sem provocar deformação (forma similar à utilizada no preenchimento de anéis para determinação de curva de retenção, em amostras deformadas).

N2 - após a determinação de macro e microporosidade relativas a N1, a amostra do anel sofreu compressões, de maneira a causar um rebaixamento do nível da terra do cilindro de cerca de 0,5 cm. A compressão foi realizada através de um cilindro de madeira, que se ajustava ao anel, empregando-se força manual e um malho.

N3 - após a determinação de macro e microporosidade relativas a N2, causou-se mais um rebaixamento adicional de cerca de 0,5 cm, utilizando-se o procedimento descrito em N2.

3.2. Análises físicas

3.2.1. Análises granulométricas

Foram realizadas com amostras de 10 g, secas ao ar, usando-se o hidróxido de sódio a 5 % como dispersante e uma agitação lenta durante 16 horas.

A fração areia foi separada por peneiramento úmido (peneira nº 270 - diâmetro 0,052 mm) e, posteriormente fracionada por peneiramento a seco. A fração argila foi determinada pelo método da pipeta e o tempo de sedimentação foi calculado empregando-se a lei de STOKES, segundo BAVER (1966).

3.2.2. Densidade das partículas (DP)

Foram utilizados 5 g de terra fina seca em estufa (TFSE) e picnômetro com volume de 50 ml de água destilada sem oxigênio solúvel, conforme procedimento descrito por BLAKE (1965).

3.2.3. Microporosidade

Para determinação da microporosidade, aplicou-se, à amostra acondicionada no anel, uma tensão de 0,006 MPA, utilizando-se uma mesa de tensão, conforme des-

crição de KIEHL (1979).

A tensão empregada, considerada como limite entre a macro e microporosidade, foi calculada através da seguinte fórmula :

$$h = \frac{2\sigma}{\rho gr}$$

onde :

h = altura da coluna de água que retira a água dos macroporos;

σ = tensão superficial de água que pode ser considerada constante, igual a 73 erg.cm^{-2} na temperatura de 20°C ;

ρ = densidade da água igual a 1 g.cm^{-3} ;

g = aceleração da gravidade, igual a 980 cm.s^{-2} ;

r = raio considerado limite entre a macro e microporosidade, igual a $0,0025 \text{ cm}$.

logo :

$$h = \frac{2 \cdot 73}{1.980 \cdot 0,0025} \quad \therefore \quad h = 60 \text{ cm} \quad \text{ou} \quad 0,006 \text{ MPA}$$

3.2.4. Densidade do solo

Foi obtida dividindo-se o peso da amostra seca em estufa, pelo volume ocupado pela amostra em cada nível de compactação.

3.2.5. Volume total de poros (VTP)

O volume total de poros foi calculado em função da densidade do solo (DS) e densidade das partículas (DP), utilizando-se a seguinte expressão :

$$VTP \% = 100 \left(1 - \frac{DS}{DP} \right)$$

3.2.6. Macroporosidade

A macroporosidade foi calculada pela diferença entre o volume total de poros e a microporosidade.

$$\text{Macro} = \text{VTP} - \text{micro}$$

3.3. Estabelecimento de equações para estimativa de macro e microporosidade

As variáveis independentes utilizadas foram : areia, limo e argila; densidade do solo; densidade das partículas e porosidade total.

As equações foram obtidas através de regressão múltipla, pelo método dos mínimos quadrados, buscando combinações das variáveis independentes que resultassem em modelos simples, se possível lineares, de alta correlação e precisão.

O parâmetro utilizado para seleção dos me-

lhores modelos foi o erro padrão da estimativa da macro e microporosidade. Assim, por exemplo, entre dois modelos de ajuste, o que apresentou menor erro padrão foi considerado o melhor.

3.4. Simbologia

Quando se utilizou notação abreviada, foram adotados os seguintes símbolos :

- Areia % ou A % - % em peso da fração areia (areia total)
- Limo % - % em peso da fração limo
- Argila % - % em peso da fração argila
- DS - densidade do solo
- DP - densidade da partícula
- M.O. % - matéria orgânica %
- PT % - porosidade total % volume
- Macro % - macroporosidade % volume
- Micro % - microporosidade % volume

OBS : note-se que a divisão das variáveis expressas em % volume do solo por DS transformam-nas em % peso. Nesses casos o termo "peso" será adicionado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 3 contém os dados de granulometria, de densidades e de porosidades, nas 10 amostras, para os três níveis de compactação. As figuras 1 e 2 representam graficamente as variações da macro e microporosidade % volume, respectivamente, com o teor de areia; as figuras 3 e 4, transformando-se a macro e microporosidade em % peso.

Analisando-se essa tabela e as figuras 2 e 4, verifica-se que, com a diminuição do teor de areia e aumento do teor de argila, há um aumento de microporosidade tanto em peso como em volume. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por GROHMANN e MEDINA (1962), SCARDUA (1972), BUCKMAN e BRADY (1976) e ARRUDA et alii (1987), que mostram que a capacidade de retenção de água aumenta progressivamente dos solos arenosos para os argilosos.

Pode-se ainda observar na tabela 3 e figura 2 a ocorrência de um aumento na microporosidade % volume, quando aumenta a densidade do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por GHILDYAL e SATYANARAYAMA (1965) e VIEIRA (1985). ARCHER e SMITH (1972) e SILVA (1984) verificaram que o teor de água por volume de solo aumenta linearmente com a

Tabela 3 - Granulometria das amostras, determinação da microporosidade e cálculo da porosidade total e macroporosidade em função da DS e DP.

AMOST.	Areia (%)	Limo (%)	Argila (%)	N*	DS	DP	PT% Macro% Micro%	(θ %)	
01	84	03	13	N ₁	1,43	2,71	47,2	22,4	24,8
				N ₂	1,71	2,71	36,9	6,8	30,1
				N ₃	1,88	2,71	30,6	4,6	26,0
02	71	07	22	N ₁	1,18	2,70	56,3	29,4	26,9
				N ₂	1,36	2,70	49,6	19,2	30,4
				N ₃	1,60	2,70	40,7	7,5	33,2
03	67	03	30	N ₁	1,19	2,70	55,9	27,3	28,6
				N ₂	1,41	2,70	47,8	14,2	33,6
				N ₃	1,75	2,70	35,2	2,6	32,6
04	64	15	21	N ₁	1,19	2,79	57,3	27,1	30,2
				N ₂	1,41	2,79	49,5	15,5	33,9
				N ₃	1,66	2,79	40,5	4,5	36,0
05	52	08	40	N ₁	1,15	2,96	61,1	29,7	31,4
				N ₂	1,37	2,96	53,7	17,5	36,2
				N ₃	1,67	2,96	43,6	4,1	39,5
06	37	23	40	N ₁	1,03	2,92	64,7	33,7	31,0
				N ₂	1,20	2,92	58,9	23,7	35,2
				N ₃	1,52	2,92	47,9	6,5	41,4
07	30	11	59	N ₁	1,07	2,87	62,7	24,0	38,7
				N ₂	1,29	2,87	55,1	10,9	44,2
				N ₃	1,56	2,87	45,6	0,6	45,0
08	17	24	59	N ₁	1,06	3,10	65,8	27,6	38,2
				N ₂	1,27	3,10	59,0	14,5	44,5
				N ₃	1,63	3,10	47,4	0,1	47,3
09	07	22	71	N ₁	1,04	3,02	65,6	22,2	43,4
				N ₂	1,25	3,02	58,6	11,4	47,2
				N ₃	1,57	3,02	48,0	0,0	48,0
10	07	15	78	N ₁	0,99	3,02	67,2	25,9	41,3
				N ₂	1,18	3,02	60,9	13,1	47,8
				N ₃	1,46	3,02	51,7	0,3	51,4

* 3 níveis de compactação

Figura 1 - Macroporosidade % volume em função do teor de areia para os 3 níveis de compactação.

Figura 2 - Microporosidade % volume em função do teor de areia para os 3 níveis de compactação.

Figura 3 - Macroporosidade % peso em função do teor de areia para os 3 níveis de compactação.

Figura 4 - Microporosidade % peso em função do teor de areia para os 3 níveis de compactação.

densidade média do solo. Expressando-se a microporosidade em % peso (Figura 4), observa-se o inverso, resultado coerente com os obtidos por CRONEY e COLEMAN (1954), CHANG e WARKENTIN (1968) e YANG e DE JONG (1971).

4.1. Introdução da granulometria nas equações

A definição do estado granulométrico de uma amostra de terra não pode ser representada quantitativamente por apenas um número. Na forma usual, mais simples, são utilizados três números : % areia total, % limo, % argila, cada um deles representando a proporção em peso da ocorrência de partículas de determinado intervalo de diâmetro, no total. Nas formas mais rigorosas de representação, a classe areia pode ser subdividida em, por exemplo, cinco sub-classes, sendo, nesse caso, necessários sete dados para a representação numérica da granulometria.

Como a soma dos valores perfaz 100 %, um dos valores pode ser obtido por diferença. Disso resulta que, em qualquer critério de representação, basta utilizar um número de fatores igual ao número de classes consideradas menos um.

Assim, por exemplo, se uma amostra contém 30 % de areia, 20 % de limo e 50 % de argila, a granulometria é perfeitamente representada através dos valores :

30 % de areia e 20 % de limo, ou, 30 % de areia e 50 % de argila, ou 20 % de limo e 50 % de argila; uma vez que o terceiro valor obtém-se por diferença.

Portanto, para se introduzir a granulometria numa equação de regressão linear múltipla, a utilização simultânea das três variáveis (areia, limo e argila) é redundante, bastando a utilização de quaisquer duas delas, que os resultados serão idênticos.

Como num equacionamento procura-se, sempre que possível, reduzir ao mínimo o número de variáveis, torna-se interessante discutir em que caso haveria a possibilidade de reduzir a representação granulométrica a apenas um número : isto só é possível quando ocorre uma alta correlação entre duas variáveis quaisquer das três consideradas (areia, limo, argila).

Muitos autores utilizam esse artifício : LEPSH et alii (1982) verificaram uma alta correlação entre a fração (limo + argila) e o teor de M.O.; VACHAUD (1988) correlacionou propriedades hídricas do solo com a fração (argila + limo); ARRUDA et alii (1987) obtiveram altas correlações entre o teor de argila + limo e o teor de água à capacidade de campo (0,03 MPA), bem como entre o mesmo teor de argila + limo e o ponto de murcha permanente (1,5 MPA) : coeficiente de correlação linear 0,88 e 0,95 respectivamente.

Dizer que se obteve um coeficiente de corre-

lação de 0,88 com argila + limo significa dizer que se obteve a mesma correlação, só que inversa (-0,88), com o teor de areia.

Tomando-se a equação do teor de água (% peso) à capacidade de campo de ARRUDA et alii (1987) :

$$\text{C.C.} = 9,93029 + 0,289568 \cdot (\text{argila \%} + \text{limo \%})$$

$$\text{com } r = 0,8820$$

e utilizando-se a transformada :

$$\text{argila \%} + \text{limo \%} = 100 - \text{areia \%}, \text{ obtêm-se :}$$

$$\text{C.C.} = 38,887 - 0,289568 \cdot \text{areia \%}$$

$$\text{com } r = -0,8820$$

Para estimativa de capacidade de campo, as duas equações geram os mesmos valores porque, dizer que um solo tem, por exemplo, 30 % de limo + argila, significa dizer que o mesmo tem 70 % de areia total, ou seja, é um artifício de transformar as três classes granulométricas em apenas duas classes.

A representação numérica de duas classes exige apenas um dado, reduzindo a representação granulométrica a apenas uma variável.

Utilizando-se essas considerações para o presente trabalho, há duas possibilidades : escolher a areia (limo + argila) ou a argila (limo + areia), ou seja, duas

maneiras de dividir a granulometria em duas classes. Mas isso só é possível se anteriormente foi verificada a existência de correlações entre as frações granulométricas.

As equações de regressão, coeficientes de correlação e erros-padrão obtidos constam da tabela 4, equações de 1 a 6. Comparando-as, verifica-se que a maior correlação foi obtida entre os teores de argila e areia, $r = 0,973$ (equações 1 e 6). Portanto, a utilização desses dois parâmetros como variáveis independentes é redundante, pois há uma forte dependência entre eles, devendo-se escolher um dos dois. O melhor é aquele que estima o outro com menor erro.

Na equação 6, a argila estima o teor de areia com um erro padrão de 6,30 %, enquanto que, na equação 1, a areia estima a argila com um erro padrão menor (5,06 %).

Portanto deduz-se que, na tentativa de se traduzir numericamente a granulometria através de apenas uma variável, a melhor delas é o teor de areia, resultado que concorda com ARRUDA et alii (1987) e VACHAUD (1988), que optaram por esse procedimento provavelmente mais por lógica e conhecimento do fenômeno físico do que propriamente pelo procedimento estatístico efetuado neste trabalho, reforçando a idéia de simplificação de representação granulométrica através de uma variável.

REEVE et alii (1973) obtiveram uma correla-

Tabela 4 - Equações lineares com uma variável independente e respectivos erro padrão e coeficiente de correlação.

EQUAÇÃO		$\hat{e}$	r
01	ARGILA % = 77,37 - 0,78 AREIA %	5,06	-0,947**
02	LIMO % = 22,63 - 0,22 AREIA %	5,06	-0,765**
03	AREIA % = 78,64 - 2,67 LIMO %	17,69	-0,765**
04	ARGILA % = 21,36 + 1,67 LIMO %	17,69	0,597
05	LIMO % = 3,90 + 0,21 ARGILA %	6,30	0,597
06	AREIA % = 96,10 - 1,21 ARGILA %	6,30	-0,973**
07	M.O. % = 2,90 - 0,0197 AREIA%	0,35	-0,858**
08	DP = 3,09 - 0,0047 AREIA%	0,065	-0,896**
09	MICRO % = 48,04 - 0,247 AREIA %	3,45	-0,892**
10	MACRO % = 13,59 + 0,030 AREIA %	10,70	0,076
11	MICRO % = 26,67 + 0,203 PT %	7,34	0,262
12	MACRO % = -26,68 + 0,797 PT %	7,34	0,729**
13	MICRO % = 40,12 - 0,090 DS	7,59	-0,068
14	MACRO % = 64,66 - 36,34 DS	5,81	-0,841**
15	MICRO % = 35,51 + 2,33/DS	7,60	0,042
16	MACRO % = -35,12 + 66,42/DS	5,73	0,846**

** - significativo a 1%.

ção entre microporosidade e o teor de areia semelhante à verificada neste trabalho.

A equação 1 permite, apenas através da informação % de areia, obter o teor de argila % e, por diferença o teor de limo, ou seja, recuperar aproximadamente a granulometria da amostra.

Na tabela 6 comparam-se os teores de limo e argila medidos com os estimados pela equação 1.

4.2. Estabelecimento das equações

Definida a representação da granulometria, através do teor de areia, fez-se a regressão múltipla, utilizando-se este parâmetro e a porosidade total para a estimativa de macro e microporosidade.

A variável porosidade total foi utilizada em volume (PT %) e em peso (PT %/DS).

As equações obtidas constam da tabela 5 (equação 17 a 20). Se a densidade das partículas (DP) fosse constante, a variável porosidade (PT) poderia ser substituída pela densidade do solo (DS) :

$$PT = 1 - \frac{DS}{DP} = 1 - \frac{DS}{\underline{k_{te}}}$$

Assumindo essa aproximação, foram obtidas as equações 21 e 22 e, colocando-se a DS no denominador, as e-

Tabela 5 - Equações lineares com duas variáveis independentes e respectivos erro padrão e coeficiente de correlação.

EQUAÇÃO		$\hat{e}$	r
17	$\text{MICRO\%} = 69,07 - 0,321 \text{ A\%} - 0,341 \text{ PT\%}$	2,22	0,958**
18	$\text{MACRO\%} = -69,07 + 0,321 \text{ A\%} + 1,341 \text{ PT\%}$	2,22	0,979**
19	$\text{MICRO\%} = 60,57 - 0,313 \text{ A\%} - 0,239 \text{ PT\%/DS}$	1,84	0,972**
20	$\text{MACRO\%} = -31,40 + 0,265 \text{ A\%} + 0,858 \text{ PT\%/DS}$	1,90	0,985**
21	$\text{MICRO\%} = 33,70 - 0,294 \text{ A\%} + 11,97 \text{ DS}$	2,21	0,959**
22	$\text{MACRO\%} = 69,29 + 0,212 \text{ A\%} - 46,47 \text{ DS}$	2,54	0,973**
23	$\text{MICRO\%} = 68,09 - 0,298 \text{ A\%} - 23,66/\text{DS}$	1,88	0,970**
24	$\text{MACRO\%} = -58,44 + 0,214 \text{ A\%} + 85,02/\text{DS}$	2,27	0,978**

** - significativo a 1%.

Tabela 6 - Comparação entre os teores de argila e limo determinados com os estimados pela equação 01*.

AMOST.	AREIA %	ARGILA %		LIMO %	
		determinado	estimado	determinado	estimado**
01	84	13	12	03	04
02	71	22	22	07	07
03	67	30	25	03	08
04	64	21	27	15	09
05	52	40	37	08	11
06	37	40	49	23	14
07	30	59	54	11	16
08	17	59	64	24	19
09	07	71	72	22	21
10	07	78	72	15	21

* Argila % = $77,37 - 0,78 \text{ Areia \%}$

** Limo % estimado = $100 - (\text{Areia \%} + \text{Argila \% estimada})$

quações 23 e 24.

Estes quatro conjuntos de duas equações são o resultado da proposta do presente trabalho.

Selecionando-se os melhores conjuntos, quando se dispõe da variável densidade da partícula (DP), o melhor conjunto é representado pelas equações 19 e 20, pois estas apresentam os menores erros-padrão. Dentre os que utilizam apenas a densidade do solo, o melhor conjunto é representado pelas equações 23 e 24, pelas mesmas razões.

É interessante notar que as diferenças de precisão são pequenas, conduzindo a resultados muito próximos e, considerando-se não só este aspecto, mas também a facilidade de uso, as equações 23 e 24 podem ser as escolhidas.

Há duas razões para explicar o bom desempenho da variável densidade do solo, em substituição à porosidade :

- a) a densidade da partícula não sofre uma variação muito grande nos diferentes solos;
- b) a variação sofrida é, em grande parte, corrigida pela variável areia, que apresenta um coeficiente de correlação de -0,896 (tabela 4, equação 8). A tabela 7 compara os valores obtidos e estimados por essa equação. Note-se, também, na tabela 8, que a equação

Tabela 7 - Valores de densidade das partículas e matéria orgânica determinados e estimados.

AMOST.	AREIA %	DP %		M.O. %	
		determinado	estimado*	determinado	estimado**
01	84	2,71	2,70	1,24	1,25
02	71	2,70	2,76	1,33	1,50
03	67	2,70	2,78	1,24	1,58
04	64	2,79	2,79	2,21	1,64
05	52	2,96	2,85	2,21	1,88
06	37	2,92	2,92	1,70	2,17
07	30	2,87	2,95	2,33	2,31
08	17	3,10	3,01	2,55	2,57
09	07	3,02	3,06	3,02	2,76
10	07	3,02	3,06	2,65	2,76

* DP = 3,09 - 0,0047 Areia %

** M.O. = 2,90 - 0,0197 Areia %

Tabela 8 - Valores de porosidade total determinados e estimados

AMOSTRA	NÍVEL DE/DENSIDADE COMPACTAÇÃO/DO SOLO		POROSIDADE TOTAL calculada estimada*	
01	N-1	1,43	47,2	47,4
	N-2	1,71	36,9	36,7
	N-3	1,88	30,6	30,4
02	N-1	1,18	56,3	57,2
	N-2	1,36	49,6	50,7
	N-3	1,60	40,7	42,0
03	N-1	1,19	55,9	57,2
	N-2	1,41	47,8	49,3
	N-3	1,75	35,2	37,1
04	N-1	1,19	57,3	57,3
	N-2	1,41	49,5	49,5
	N-3	1,66	40,5	40,5
05	N-1	1,15	61,1	59,6
	N-2	1,37	53,7	51,9
	N-3	1,67	43,6	41,4
06	N-1	1,03	64,7	64,7
	N-2	1,20	58,9	58,9
	N-3	1,52	47,9	47,9
07	N-1	1,07	62,7	63,7
	N-2	1,29	55,1	56,3
	N-3	1,56	45,6	47,1
08	N-1	1,06	65,8	64,8
	N-2	1,27	59,0	57,8
	N-3	1,63	47,4	45,8
09	N-1	1,04	65,6	66,0
	N-2	1,25	58,6	59,2
	N-3	1,57	48,0	48,7
10	N-1	0,99	67,2	67,6
	N-2	1,18	60,9	61,4
	N-3	1,46	51,7	52,3

* $PT\% = [1 - DS / (3,09 - 0,0047 \text{ Areia } \%)] 100$

$PT = 1 - DS / (3,09 - 0,0047 A \%)$ produz boas estimativas.

Nessa linha de raciocínio, nota-se que o teor de matéria orgânica é considerado indiretamente, uma vez que o mesmo também se correlaciona com a areia %, como pode-se verificar em LEPSH (1982). Consta também da tabela 7 os valores de M.O. medidos e estimados pela equação 7.

A tabela 9 apresenta uma comparação entre os valores medidos de macro e microporosidade % volume e os estimados pelo melhor conjunto que se utiliza apenas das variáveis A % e DS (equações 23 e 24), e, ainda, os calculados pelo melhor conjunto que se utiliza, além dessas variáveis, da densidade real, ou seja, da porosidade total (equações 19 e 20).

Na tabela 10, são apresentadas as estimativas da macroporosidade, utilizando-se a equação nº 24.

Tabela 9 - Valores de macro e microporosidade % volume determinados e estimados.

AMOST.	valores determinados		valores estimados			
	Micro	Macro	Micro eq.19	Macro eq.20	Micro eq.23	Macro eq.24
01	24,8	22,4	26,4	19,2	26,5	19,0
	30,1	6,8	29,1	9,4	29,2	9,3
	26,0	4,6	30,4	4,8	30,5	4,8
02	26,9	29,4	26,9	28,4	26,9	28,8
	30,4	19,2	29,6	18,7	29,5	19,3
	33,2	7,5	32,3	9,2	32,1	9,9
03	28,6	27,3	28,4	26,6	28,2	27,3
	33,6	14,2	31,5	15,4	31,3	16,2
	32,6	2,6	34,8	3,6	34,6	4,5
04	30,2	27,1	29,0	26,9	29,1	26,7
	33,9	15,5	32,1	15,7	32,2	15,6
	36,0	4,5	34,7	6,5	34,8	6,5
05	31,4	29,7	31,6	28,0	32,0	26,6
	36,2	17,5	34,9	16,0	35,3	14,7
	39,5	4,1	38,1	4,8	38,4	3,6
06	31,0	33,7	34,0	32,3	34,1	32,0
	35,2	23,7	37,3	20,5	37,3	20,3
	41,4	6,5	41,5	5,4	41,5	51,4
07	38,7	24,0	37,2	26,8	37,0	27,4
	44,2	10,9	41,0	13,2	40,8	13,9
	45,0	0,6	44,2	1,6	44,0	2,5
08	38,2	27,6	40,4	26,4	40,7	25,4
	44,5	14,5	44,1	13,0	44,4	12,1
	47,3	0,1	48,3	-1,9	48,5	-2,6
09	43,4	22,2	43,3	24,6	43,3	24,8
	47,2	11,4	47,2	10,7	47,1	11,1
	48,0	0,0	51,1	-3,3	50,9	-2,8
10	41,3	25,9	42,2	28,7	42,1	28,9
	47,8	13,1	46,0	14,7	46,0	15,1
	51,4	0,3	49,9	0,8	49,8	1,3

utilizando-se a equação n° 24.

DS AREIA	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0	26,6	22,5	18,9	15,5	12,4	9,6	7,0	4,5	2,3	0,2	-	-	-	-	-	-	-
5	27,7	23,6	19,9	16,6	13,5	10,6	8,0	5,6	3,4	1,3	-	-	-	-	-	-	-
10	28,7	24,7	21,0	17,6	14,6	11,7	9,1	6,7	4,4	2,3	0,4	-	-	-	-	-	-
15	29,8	25,7	22,1	18,7	15,6	12,8	10,2	7,7	5,5	3,4	1,5	-	-	-	-	-	-
20	30,9	26,8	23,1	19,8	16,7	13,9	11,2	8,8	6,6	4,5	2,5	0,7	-	-	-	-	-
25	31,9	27,9	24,2	20,8	17,8	14,9	12,3	9,9	7,6	5,5	3,6	1,8	-	-	-	-	-
30	33,0	29,0	25,3	21,9	18,8	16,0	13,4	11,0	8,7	6,6	4,7	2,8	1,1	-	-	-	-
35	34,1	30,0	26,3	23,0	19,9	17,1	14,5	12,0	9,8	7,7	5,7	3,9	2,2	0,6	-	-	-
40	35,1	31,1	27,4	24,1	21,0	18,1	15,5	13,1	10,8	8,6	6,8	5,0	3,3	1,6	0,1	-	-
45	36,2	32,2	28,5	25,1	22,0	19,2	16,6	14,2	11,9	9,8	7,9	6,0	4,3	2,7	1,2	-	-
50	37,3	33,2	29,6	26,2	23,1	20,3	17,7	15,2	13,0	10,9	8,9	7,1	5,4	3,8	2,3	0,8	-
55	38,4	34,3	30,6	27,3	24,2	21,3	18,7	16,3	14,1	12,0	10,0	8,2	6,5	4,9	3,3	1,9	0,6
60	39,4	35,4	31,7	28,3	25,3	22,4	19,8	17,4	15,1	13,0	11,1	9,3	7,5	5,9	4,4	3,0	1,6
65	40,5	36,4	32,8	29,4	26,3	23,5	20,9	18,4	16,2	14,1	12,2	10,3	8,6	7,0	5,5	4,1	2,7
70	41,6	37,5	33,8	30,5	27,4	24,6	21,9	19,5	17,3	15,2	13,2	11,4	9,7	8,1	6,6	5,1	3,8
75	42,6	38,6	34,9	31,5	28,5	25,6	23,0	20,6	18,3	16,2	14,3	12,5	10,7	9,1	7,6	6,2	4,8
80	43,7	39,7	36,0	32,6	29,5	26,7	24,1	21,7	19,4	17,3	15,4	13,5	11,8	10,2	8,7	7,3	5,9
85	44,8	40,7	37,0	33,7	30,6	27,8	25,2	22,7	20,5	18,4	16,4	14,6	12,9	11,3	9,8	8,3	7,0
90	45,8	41,8	38,1	34,8	31,7	28,8	26,2	23,8	21,5	19,5	17,5	15,7	14,0	12,3	10,8	9,4	8,1
95	46,9	42,9	39,2	35,8	32,7	29,9	27,3	24,9	22,6	20,5	18,6	16,7	15,0	13,4	11,9	10,5	9,1
100	48,0	43,9	40,3	36,9	33,8	31,0	28,4	25,9	23,7	21,6	19,6	17,8	16,1	14,5	13,0	11,5	10,2

4.3. Comparação de dados de literatura com dados estimados pelas equações

Nas tabelas seguintes encontram-se os valores de micro e macroporosidade obtidos por FREIRE (1975) - tabela 11; PRIMAVESI (1984) - tabela 12 e SCARDUA (1972) - tabela 13, e aqueles estimados pelas equações citadas anteriormente neste trabalho (que utilizaram os valores de areia %, densidade de solo e densidade da partícula), com o objetivo de se fazer uma comparação entre esses resultados.

4.4. Estimativas dos níveis críticos de densidade do solo

Sendo a densidade inversamente proporcional à porosidade, muitos autores tentam utilizá-la como indicador para o preparo de solo. Entretanto é fundamental definir-se o seu limite crítico, a partir do qual o solo apresenta condições inadequadas para a cultura, uma vez que este limite depende de vários fatores, tais como : granulometria, densidade das partículas, estrutura, etc.

PRIMAVESI et alii (1984), procurando selecionar parâmetros básicos mais adequados para estudar os efeitos de compactação de amostras de solo sobre a produção vegetal, verificaram que a porcentagem de poros de aeração foi o indicador mais adequado.

Tabela 11- Dados de micro e macroporosidade % volume obtidos por FREIRE (1975), em Latossolo Roxo Distrófico, e os estimados através de equações.

Areia (%)	DS	DP	<u>Micro</u> <u>Macro</u> (FREIRE)	<u>Micro</u> <u>Macro</u> eq.19 eq.20	<u>Micro</u> <u>Macro</u> eq.23 eq.24
15	0,90	2,74	34,4 32,8	38,0 36,6	37,3 39,2
11	0,99	2,85	37,7 27,6	41,4 28,1	40,9 29,8
10	0,98	2,89	38,5 27,6	41,3 29,1	41,0 30,5
10	0,98	2,89	38,7 27,4	41,3 29,1	41,0 30,5
10	0,97	2,89	37,4 29,0	41,1 30,0	40,7 31,3
10	0,96	2,89	42,7 24,1	40,8 30,9	40,5 32,3
11	0,96	2,86	39,5 26,9	40,6 30,9	40,5 32,5

Tabela 12 - Dados de micro e macroporosidade % volume obtidos por PRIMAVESI et alii (1984), em Latossolo Roxo e Podzólico Vermelho Amarelo, e os estimados pelas equações.

Areia (%)	DS	DP	Micro (PRIMAVESI)	Macro	Micro eq.19	Macro eq.20	Micro eq.23	Macro eq.24
21,7	1,14	2,86	40,1	20,1	41,2	19,6	40,9	20,8
21,7	1,30	2,86	43,5	11,3	43,8	10,4	43,4	11,6
21,7	1,36	2,86	43,8	8,9	44,6	7,4	44,2	8,7
18,7	1,10	3,03	34,4	29,4	40,9	23,2	41,0	22,9
18,7	1,13	3,03	38,8	24,0	41,5	21,2	41,6	20,8
18,7	1,19	3,03	40,1	20,5	42,5	17,3	42,6	17,0
.....								
37,7	1,42	2,58	36,0	9,2	41,2	5,8	40,2	9,5
37,7	1,49	2,58	36,5	5,8	42,0	2,9	41,0	6,7
37,7	1,63	2,58	33,5	3,3	43,4	0,0	42,3	1,8
22,3	1,27	2,65	30,9	21,3	43,8	9,7	42,8	13,3
22,3	1,47	2,65	30,1	14,6	46,4	0,5	45,3	4,2
22,3	1,54	2,65	30,8	11,1	47,1	0,0	46,1	1,5

Tabela 13- Dados de micro e macroporosidade % volume obtidos por SCARDUA (1972), em Regosol e Terra Roxa Estruturada, e os estimados através de equações.

Areia (%)	DS	DP	<u>Micro</u> <u>Macro</u> (SCARDUA)	<u>Micro</u> <u>Macro</u> eq.19 eq.20	<u>Micro</u> <u>Macro</u> eq.23 eq.24
80	1,57	2,53	27,9	9,9	29,8 10,4
80	1,65	2,66	25,4	12,3	30,1 9,4
77	1,59	2,63	25,6	14,3	30,5 10,6
68	1,53	2,63	26,4	15,7	32,7 10,1
72	1,52	2,58	27,3	14,1	31,5 11,1
72	1,51	2,53	27,9	12,5	31,6 10,6
.....					
37	1,51	2,87	34,6	12,9	41,5 5,5
38	1,51	2,83	36,1	11,5	41,3 5,1
41	1,48	2,80	35,6	12,6	40,2 6,7
27	1,36	2,86	36,3	16,3	42,9 9,0
29	1,35	2,88	41,4	11,8	42,0 10,2
26	1,32	2,84	40,8	12,6	42,8 10,2

O limite mínimo de macroporos adequado ao desenvolvimento de um grande número de culturas está entre 10 e 15 %, segundo VOMOCIL e FLOCKER (1961) e ARCHER e SMITH (1972). Para BAVER e FARWORT (1940) e BAVER (1970) este limite é 10 %. Desse modo, o limite crítico de macroporos deve levar em consideração a cultura a ser utilizada. No caso específico da cana-de-açúcar, encontra-se em torno de 10 %, de acordo com SCARBROOK (1952) e ROBINSON (1964).

Utilizando esse conceito de limite mínimo de macroporos, foram obtidas equações que estimam a densidade de solo neste limite :

Considerando :

1) MACRO % LIMITE = 10 :

a) Utilizando-se a equação 20, obtém-se :

$$DS = \frac{85,8 \cdot DP}{85,8 + (41,4 - 0,265 A \%) DP}$$

b) Utilizando-se a equação 24 (mais simplificada), obtém-se :

$$DS = \frac{85,02}{68,44 - 0,214 A \%}$$

c) Utilizando-se a equação 19 (mais precisa), obtém-se :

$$DS = \frac{(0,313A\% + 29,43)DP - 23,9 + \sqrt{[(0,313A\% + 29,43)DP - 23,9]^2 + 9560DP}}{200}$$

2) MACRO % LIMITE = 15 :

a) Utilizando-se a equação 20, obtém-se :

$$DS = \frac{85,8 \cdot DP}{85,8 + (46,4 - 0,265 A \%) DP}$$

b) Utilizando-se a equação 24, obtém-se :

$$DS = \frac{85,02}{73,44 - 0,214 A \%}$$

c) Utilizando-se a equação 19, obtém-se :

$$DS = \frac{(0,313A\% + 24,43)DP - 23,9 + \sqrt{[(0,313A\% + 24,43)DP - 23,9]^2 + 9560DP}}{200}$$

Apesar da aparente complexidade, a estimativa da densidade de solo em função da microporosidade deve ser considerada, pois apresenta maior precisão, uma vez que é oriunda da equação na qual ocorre o menor erro-padrão, ou seja, a equação 19.

4.5. Cálculo da DS em função das equações que estimam a macro e microporosidade

Os dados apresentados nas tabelas 14 e 15 foram obtidos utilizando-se cálculos semelhantes aos que se observam no exemplo seguinte :

Considerando-se :

$$\text{EQUAÇÃO 19 : } \text{MICRO \%} = 60,57 - 0,313 \text{ A \%} - 0,239 \frac{\text{PT \%}}{\text{DS}}$$

Onde :

A = quantidade total de areia

PT = porosidade total

DS = densidade de solo

Sendo :

a) limite mínimo de macroporos = 10 %

$$\text{b) } \text{PT \%} = \left(1 - \frac{\text{DS}}{\text{DP}}\right) 100 \quad \therefore \frac{\text{PT \%}}{\text{DS}} = \left(\frac{1}{\text{DS}} - \frac{1}{\text{DP}}\right) 100$$

$$\text{c) } \text{MACRO \%} = \text{PT \%} - \text{MICRO \%}$$

Obtém-se :

$$10 = \left(1 - \frac{\text{DS}}{\text{DP}}\right) 100 - \left| 60,57 - 0,313 \text{ A \%} - 0,239 \left(\frac{1}{\text{DS}} - \frac{1}{\text{DP}}\right) 100 \right|$$

$$10 = 100 - 100 \frac{\text{DS}}{\text{DP}} - 60,57 + 0,313 \text{ A \%} + \frac{23,9}{\text{DS}} - \frac{23,9}{\text{DP}}$$

$$100 - 60,57 - 10 - 100 \frac{\text{DS}}{\text{DP}} + 0,313 \text{ A \%} + \frac{23,9}{\text{DS}} - \frac{23,9}{\text{DP}} = 0$$

$$29,43 \cdot \text{DP} \cdot \text{DS} - 100 \cdot \text{DS}^2 + 0,313 \text{ A \%} \cdot \text{DP} \cdot \text{DS} + 23,9 \text{ DP} - 23,9 \text{ DS} = 0$$

$$100 \text{ DS}^2 - \left| (0,313 \text{ A \%} + 29,43) \text{ DP} - 23,9 \right| \text{ DS} - 23,9 \text{ DP} = 0$$

Conclui-se :

$$\text{DS} = \frac{(0,313 \text{ A \%} + 29,43) \text{ DP} - 23,9 + \sqrt{\left[(0,313 \text{ A \%} + 29,43) \text{ DP} - 23,9 \right]^2 + 9560 \text{ DP}}}{200}$$

Tabela 14 - Cálculo da densidade do solo para obter-se macroporosidade igual a 10 %, utilizando-se as equações que estimam a macro e microporosidade.

EQUAÇÃO

$$17 \text{ e } 18 \quad DS = \frac{(55,03 + 0,321 A \%) DP}{134,1}$$

$$19 \quad DS = \frac{(0,313A\%+29,43)DP-23,9 + \sqrt{[(0,313A\%+29,43)DP-23,9]^2 + 9560 DP}}{200}$$

$$20 \quad DS = \frac{85,8 DP}{85,8 + (41,4 - 0,265 A \%) DP}$$

$$21 \quad DS = \frac{0,294 A \% . DP + 56,3 DP}{100 + 11,97 DP}$$

$$22 \quad DS = \frac{59,29 + 0,212 A \%}{46,47}$$

$$23 \quad DS = \frac{(0,298 A \% + 21,91) DP + \sqrt{[(0,298 A \% + 21,91) DP]^2 + 9464 DP}}{200}$$

$$24 \quad DS = \frac{85,02}{68,44 - 0,214 A \%}$$

Tabela 15 - Cálculo da densidade do solo para obter-se macroporosidade igual a 15 %, utilizando-se as equações que estimam a macro e microporosidade.

EQUAÇÃO

$$17 \text{ e } 18 \quad DS = \frac{(50,03 + 0,321 A \%) DP}{134,1}$$

$$19 \quad DS = \frac{(0,313A\% + 24,43) DP - 23,9 + \sqrt{[(0,313A\% + 24,43) DP - 23,9]^2 + 9560 DP}}{200}$$

$$20 \quad DS = \frac{85,8 DP}{85,8 + (46,4 - 0,265 A \%) DP}$$

$$21 \quad DS = \frac{0,294 A \% \cdot DP + 51,3 DP}{100 + 11,97 DP}$$

$$22 \quad DS = \frac{54,29 + 0,212 A \%}{46,47}$$

$$23 \quad DS = \frac{(0,298 A \% + 16,91) DP + \sqrt{[(0,298 A \% + 16,91) DP]^2 + 9464 DP}}{200}$$

$$24 \quad DS = \frac{85,02}{73,44 - 0,214 A \%}$$

Com o objetivo de facilitar a obtenção dos resultados que estimam o limite de densidade do solo a partir da equação 19, foram construídos âbacos (figuras 5 e 6).

4.6. Considerações gerais

No item 4.3 são feitas estimativas dos níveis críticos de densidade do solo, em função do limite mínimo de macroporos adequado ao desenvolvimento de uma dada cultura. Como a retenção de água a baixas tensões é maior em amostras deformadas do que em amostras indeformadas, segundo SCARDUA (1972) e MOREIRA & SILVA (1987), os limites críticos de densidade do solo estimados pelas equações provavelmente estarão subestimados, quando comparados aos valores obtidos em amostras indeformadas, apresentando, dessa forma, maior segurança quanto ao nível de macroporosidade adequado.

É importante ressaltar que a granulometria e a densidade das partículas são características estáveis do solo, logo estas determinações deverão ser feitas apenas uma vez. Deste modo, apenas a densidade do solo deverá ser determinada de forma rotineira ao longo dos anos, o que não acarretará maiores dificuldades, já que é uma determinação simples e fácil de ser executada.

Quanto à utilização prática das equações 19,

Figura 5 - Determinação da densidade do solo em função do teor de areia e densidade das partículas, para obter-se uma macroporosidade igual a 10 %.

OBS : Este gráfico foi construído a partir da equação abaixo :

$$DS = \frac{(0,313A\% + 29,43)DP - 23,9 + \sqrt{[(0,313A\% + 29,43)DP - 23,9]^2 + 9560 DP}}{200}$$

Figura 6 - Determinação da densidade do solo em função do teor de areia e densidade das partículas, para obter-se uma macroporosidade igual a 15 %.

OBS : Este gráfico foi construído a partir da equação abaixo :

$$DS = \frac{(0,313A\% + 24,43) DP - 23,9 + \sqrt{[(0,313A\% + 24,43) DP - 23,9]^2 + 9560 DP}}{200}$$

20 e 24, sugere-se :

a) aplicá-las na indicação do manejo do solo, em função do limite mínimo de macroporosidade adequado para uma determinada cultura, uma vez que as determinações físicas (retenção de água, permeabilidade e aeração) necessárias para uma avaliação adequada do solo são complexas, necessitando de laboratório e pessoal qualificados, o que restringe o seu uso a um número muito reduzido de agricultores. Assim sendo, o objetivo dessas equações é facilitar a avaliação do solo para indicação do manejo mais adequado e permitir sua utilização a um maior número de produtores rurais, quando houver impossibilidade de se fazer as determinações físicas necessárias.

b) o comportamento geral das 10 amostras, nos três níveis de compactação, resultou bastante coerente. Quando os valores medidos e estimados são muito diferentes, isso pode indicar um comportamento da amostra diferente daquele representado pelas 10 amostras utilizadas no trabalho. Isto é, pode ser uma maneira de detectar condições de distribuição atípica de macro e microporos.

c) Finalmente existe a possibilidade de usar o mesmo modelo, mas ajustando os coeficientes para uma determinada propriedade ou região.

5. CONCLUSÕES

1. Pelas análises dos dados obtidos, restritas às condições deste ensaio, conclui-se que :

1.1. A macro e microporosidade em volume podem ser estimadas através do teor de areia (A %), densidade do solo (DS) e das partículas (DP), pelas seguintes equações :

Sendo :

$$PT \% / DS = (1/DS - 1/DP) 100$$

$$a) \text{ MICRO \%} = 60,57 - 0,313 A \% - 0,239 \frac{PT \%}{DS} \dots\dots\dots (19)$$

Onde :

erro padrão de regressão $\hat{e} = 1,84 \%$

coeficiente de correlação múltipla $r = 0,972^{**}$

$$b) \text{ MACRO \%} = -31,40 + 0,265 A \% + 0,858 \frac{PT \%}{DS} \dots\dots\dots (20)$$

Onde :

erro padrão de regressão $\hat{e} = 1,90$

coeficiente de correlação múltipla $r = 0,985^{**}$

1.2. Quando não se dispõe da densidade das partículas (DP), podem ser estabelecidas equações que dispensem essa variável, correlacionando a micro e macroporosidade apenas com o teor de areia (A %) e a densidade do solo (DS).

$$a) \text{ MICRO \%} = 68,09 - 0,298 \text{ A \%} - 23,66/\text{DS} \dots\dots\dots (23)$$

Onde :

erro padrão de regressão $\hat{e} = 1,88 \%$

coeficiente de correlação múltipla $r = 0,970^{**}$

$$b) \text{ MACRO \%} = -58,44 + 0,214 \text{ A \%} + 85,02/\text{DS} \dots\dots\dots (24)$$

Onde :

erro padrão de regressão $\hat{e} = 2,27 \%$

coeficiente de correlação múltipla $r = 0,978^{**}$

1.3. A eliminação da variável DP praticamente não altera a precisão das estimativas, quando se compara os erros padrão das equações 19 e 20 com os da 23 e 24. Isto pode ser atribuído ao fato do teor de areia corrigir indiretamente as variações de DP, já que verificou-se uma alta correlação entre estas variáveis :

$$\text{DP} = 3,09 - 0,0047 \text{ A \%}$$

erro padrão de regressão $\hat{e} = 0,065$

coeficiente de correlação $r = -0,896$

1.4. A granulometria pode ser representada através apenas da classe areia, devido ao fato de se constatar uma alta correlação entre esta variável e o teor de argila :

$$\text{argila \%} = 77,37 - 0,78 \text{ areia \%}$$

$$\text{erro padrão de regressão } \hat{e} = 5,06 \%$$

$$\text{coeficiente de correlação } r = -0,973$$

2. Considerando o conceito de limite crítico de macroporosidade abaixo do qual uma dada cultura apresentaria seu desenvolvimento prejudicado, a equação 20 ou sua equivalente mais simples - a 24, ou ainda a equação 19, que apresenta maior precisão, permite estabelecer o "limite crítico de densidade do solo", acima do qual haveria esse efeito. Sendo o limite mínimo de macroporos adequado ao desenvolvimento de uma determinada cultura igual a 10 % e, fazendo-se sua substituição nas três equações, obtêm-se :

$$DS = \frac{85,8 \text{ DP}}{85,8 + (41,4 - 0,265 \text{ A \%}) \text{ DP}} \quad (\text{oriunda da eq. 20})$$

$$* DS = \frac{85,02}{68,44 - 0,214 \text{ A \%}} \quad (\text{oriunda da eq. 24})$$

$$DS = \frac{(0,313\text{A\%} + 29,43)\text{DP} - 23,9 + \sqrt{[(0,313\text{A\%} + 29,43)\text{DP} - 23,9]^2 + 9560 \text{ DP}}}{200} \quad (\text{oriunda da eq. 19})$$

6. LITERATURA CITADA

ARCHER, J.R. e P.D. SMITH, 1972. The relation between bulk density available water capacity and air capacity of soils. Journal of Soil Science. Oxford, 23 (4): 475-480.

ARRUDA, F.B., J. ZULLO Jr. e J.B. DE OLIVEIRA, 1987. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, 11: 11-15.

BACHE, B.W., C.A. FROST e R.H.E. INKSON, 1981. Moisture release characteristics and porosity of twelve SCOTTISH SOIL series and their variability. Journal of Soil Science. Oxford, 32: 505-520.

BALL, B.C., 1981. Pore characteristics of soil from two cultivation experiments as shown by gas diffusivities and permeabilities and air-filled porosities. Journal of Soil Science. Oxford, 32: 483-498.

BARLEY, K.P., 1962. The effects of mechanical stress on the

growth of roots. Journal of Experimental Botany. London, 13 (37): 95-110.

BAVER, L.D., 1966. The mechanical composition of soils. In: _____ . Soil physics. 3a. ed. New York, J. Wiley & Sons Inc., p. 48-80.

BAVER, L.D. e R.B. FARNSWORTH, 1940. Soil structure effects on the growth of sugar beets. Soil Science American Proceedings. Madison, 5: 45-48.

BAVER, L.D., W.H. GARDNER e W.R. GARDNER, 1973. Física de Suelo. Mexico, Union Tipográfica Editorial Hispano-Americana. 529p.

BELTRAME, L.F.S., L.A.P. GONDIM e J.C. TAYLOR, 1981. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo. 5 (3): 145-149.

BENDIXEN, T.W., M.F. HERSHBERGER e C.S. SLATER, 1948. A basis for classifying soil permeabilities. Journal Agricultural Research. Lahore, 77: 157-168.

BERTRAND, A.R. e H. KOHNKE, 1957. Subsoil conditions and their effects on oxygen supply and growth of corn roots. Soil Science Society American Proceedings. Madison, 21

(2): 135-140.

BLAKE, G.R., 1965. Bulk density. In: _____. Methods of soil analysis physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison, American Society of Agronomy, p. 374-390.

BUCKMAN, H.O. & N.C., BRADY, 1976. Natureza e propriedades dos solos. 4a. ed. Rio de Janeiro, Livraria Freitas Bastos. 594p.

CAMARGO, O.A., 1983. Compactação do solo e desenvolvimento de plantas. Campinas, Fundação Cargill. 44p.

CHANG, R.K. e B.P. WARKENTIN, 1968. Volume change of compacted clay soil aggregates. Soil Science. Baltimore, 105: 106-111.

COLETTI, J.T. e J.L.I. DEMATTÊ, 1982. Compactação artificial em solos. Experiências e dados informativos. Alcool e Açúcar. São Paulo, 2: 34-39.

CRONEY, D. e J.D. COLEMAN, 1954. Soil structure in relation to soil suction (pF). Journal of Soil Science. Oxford, 5: 75-84.

FREIRE, J.C., 1975. Retenção de umidade em perfil oxissol do município de Lavras, Minas Gerais. Piracicaba, ESALQ/USP. 76p. (Dissertação de Mestrado).

GHILDYAL, B.P. e T. SATYANARAYAMA, 1965. Effects of compaction on the physical properties of four different soils. Indian Journal Society Soil Science, 13: 149-155.

GILL, W.R., 1959. Soil compaction by traffic. Agricultural Engineering. St. Joseph, 40(7): 392-394, 400, 402.

GOEDERT, W.J. e M.T. BEATTY, 1971. Caracterização de Grumossolos no sudoeste do RS. I. Propriedades físicas adversas ao uso. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Série Agrônômica. Brasília, 6: 91-102.

GROHMANN, F., 1975. Compacidade. In: MONIZ, A.C., Coord. Elementos de pedologia. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, p. 93-99.

GROHMANN, F. e H.P. MEDINA, 1962. Características de umidade dos principais solos do Estado de São Paulo. Bragantia. Campinas, 21(18): 285-295.

HARRIS, W.L., 1971. The soil compaction process. In : _____. Compaction of Agricultural Soils. American So-

ciety of Agricultural Engineers, p. 9-44.

JAMIESON, U.C., 1956. Pertinent factors governing the availability of soil moisture to plants. Soil Science Society of American Journal. Madison, 81: 459-471.

KIEHL, E.J., 1979. Manual de edafologia : relações solo - planta. São Paulo, Ceres. 264p.

LEPSCH, I.F., N.M. DA SILVA e A. ESPIRONELO, 1982. Relação entre matéria orgânica e textura de solos sob cultivo de algodão e cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Bragantia. Campinas, 41(8): 231-240.

MARCOS, Z.Z., 1971. Morphologia and physical properties of fine-texture oxisols, state of São Paulo. Ohio State University. 272p. (Tese PhD).

MOREIRA, J.A.A., C.J.C.G. DA SILVA, 1987. Características de retenção de água de um solo podzólico vermelho-amarelo de Goiana, Pernambuco. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, 22(4): 411-418.

MOURA FILHO, W. e S.W. BUOL, 1972. Studies of a Latossol Roxo (Eutruxox) in Brazil. Experientiae. Viçosa, 13: 201-234.

- OLIVEIRA, L.B. & V. MELO, 1970. Caracterização físico-hídrica do solo I. Unidade Itapirema. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, Série Agronômica, 5: 35-48.
- OLIVEIRA, L.B. & V. MELO, 1971. Correlação entre o equivalente de umidade e a microporosidade em solos do Nordeste I. Solos Podzolizados. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, Série Agronômica, 6: 173-176.
- PRIMAVESI, O., F.A.F. MELO e P.L. LIBARDI, 1984. Seleção preliminar de parâmetros físicos mais adequados para estudar o efeito de compactação de amostras de solo sobre a produção de matéria seca vegetal de feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.). Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba, 41(1): 449-483.
- PROCTOR, R.R., 1933. Fundamental principles of soil compaction. Engineering News Record. New York, 111(9) : 245-248.
- REEVE, M.I., P.D. SMITH e A.J. THOMASSON, 1973. The effect of density on water retention properties of field soils. Journal of Soil Science. Oxford, 24() : 355-367.
- RICHARDS, L.A. e C.N. WADLEIGH, 1952. Soil water and plant growth. In: _____. Soil physical conditions and plant growth. New York, Academic Press, Inc., p. 73-252.

ROBINSON, F.E., 1964. Required percent air space for normal growth of sugar cane. Soil Science. Baltimore, 98: 206-207.

RODELLA, A.A., 1983. Métodos de análise do solo, tecido vegetal e torta de filtro. In: ORLANDO FILHO, J., Coord. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, IAA/Planalsucar. Cap. 15, p. 351-68.

SALTER, P.J. e J.B. WILLIAMS, 1969. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. V. Relationship between particle-size composition and moisture contents at the upper and lower limits of available-water. Journal of Soil Science. Oxford, 20(1): 126-131.

SCARDUA, R., 1972. Porosidade livre de água de dois solos do município de Piracicaba, S.P. Piracicaba, ESALQ/USP. 83p. (Dissertação de Mestrado).

SCARBROOK, C.E., J.D. DEMENT e M.B. STURGIS, 1952. Depth to plow pan as a factor in sugar cane production. Soil Science American Proceedings. Madison, 16: 148-150.

SILVA, A.P., 1984. Influência da compactação nas propriedades físicas do solo e no sistema radicular de plântulas de algodão (Gossypium hirsutum, L.). Piracicaba, ESALQ/

USP. 75p. (Dissertação de mestrado).

STOLF, R., 1987. A compactação do solo e perspectivas da subsolagem em citros. Laranja. Cordeirópolis, 2(8): 283-308.

SWARTZ, W.E. e L.T. KARDOS, 1963. Effects of compaction on physical properties of sand soil peat mixtures at various moisture contents. Agronomy Journal. Madison, 55: 7-10.

TACKETT, J.L. e R.W. PEARSON, 1964. Oxygen requirements of cotton seedling roots for penetration of compacted soil cores. Soil Science Society American Proceedings. Madison, 28: 600-605.

TAYLOR, S.A., 1950. Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. Soil Science Society American Proceedings. Madison, 14: 55-61.

TAYLOR, H.M. e E. BURNETT, 1963. Some effects of compacted soil pans on plant growth in the Southern Great Plains. Journal Soil Water Conservation. Anpeny, 18: 235-236.

VACHAUD, G., 1988. Stochastic approach of water transport in field. In: ESCUELA LATINOAMERICANA DE FÍSICA DE SUELOS. São Carlos, VAPDIA/EMBRAPA, p. 1-17.

VEIHMAYER, F.J. e A.H. HENDRICKSON, 1948. Soil density and root penetration. Soil Science. Baltimore, 65(4): 487-493.

VIEIRA, M.J., 1985. Comportamento físico do solo em plantio direto. In: _____. Atualização em plantio direto. Campinas, Fundação Cargill, p. 163-178.

VOMOCIL, J.A. e W.J. FLOCKER, 1961. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. Transaction of the ASAE. St. Joseph, 4(2): 242-246.

WEAVER, H.A., 1950. Tractor use effects on volume weight of Davidson loam. Agricultural Engineering. St. Joseph, 31: 182-183.

WINKLER, E.I.G. e W.J. GOEDERT, 1972. Características hídricas dos solos de Pelotas, R.S. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, Série Agronômica, 7: 1-4.

YANG, S.J. e E. DE JONG, 1971. Effect of soil water potential and bulk density on water uptake patterns and resistance to flow of water in wheat plants. Canadian Journal Soil Science. Ohawa, 51: 211-220.