

INFLUÊNCIA DA SUBSOLAGEM E GRADAGEM DO SOLO NA DINÂMICA
DA ÁGUA NO PERFIL

JOSÉ ANTONIO JORGE

Orientador: *PAULO LEONEL LIBARDI*

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

PIRACICABA
Estado de São Paulo – Brasil
Março, 1983

Homenagem

à minha mãe

à minha sogra

Homenagem Póstuma

a meu pai

a meu sogro

D E D I C O

ã minha esposa *Marina*

e aos meus filhos

Mônica

Celso Antonio

Luis Henrique

AGRADECIMENTOS

- Ao *Dr. Paulo Leonel Libardi*, Professor do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP e Pesquisador Científico da Seção de Física de Solos do CENA/USP, pela dedicação e orientação segura no desenvolvimento deste trabalho.
- À *Usina Barrá Grande*, em Lençóis Paulista (SP), na pessoa do *Engenheiro Agrônomo José Osório Campos Almeida*, pelas facilidades oferecidas na implantação do experimento de campo.
- Aos colegas *L. L. Foloni* e *Célio Luis F. de Almeida*, pela eficiente colaboração nos trabalhos de campo.
- Aos *Drs. Dirceu Ciaramello, Álvaro Zingra do Amaral* e *João Bertoldo de Oliveira*, respectivamente, Diretor Geral, Diretor da Divisão de Solos e Chefe da Seção de Pedologia, por viabilizarem a realização do Curso de Pós-Graduação e o desenvolvimento deste trabalho.
- Aos colegas *Dr. Igo Fernando Lepsch, Dr. Orivaldo Brunini* e *Marcelo Bento Paes de Camargo*, pelas sugestões apresentadas, e *Dr. Toshio Igue*, pela orientação nas análises estatísticas.

Í N D I C E

	<u>Página</u>
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
3. MATERIAL E MÉTODO	12
3.1. Solo	12
3.2. Equipamentos	13
3.3. Tratamentos Utilizados	22
3.4. Método de LIBARDI <i>et alii</i> (1980)	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1. Velocidade de Infiltração	30
4.2. Condutividade Hidráulica Saturada a partir do Método de LIBARDI <i>et alii</i> (1980)	32
4.3. Teor de Água no Perfil do Solo	35
4.4. Regressões de Umidade (θ) versus logaritmo do tempo de drenagem ($\ln t$)	41
4.5. Condutividade Hidráulica em Função da Umidade	41
5. CONCLUSÕES	49
6. LITERATURA CITADA	51
7. APÊNDICE	56

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
1	- Balanço hídrico segundo Thornthwaite e Mather	18
2	- Curva característica do solo estudado	19
3	- Saturação do solo e instalação dos equipamentos	20
4	- Cilindros metálicos	20
5	- Cilindro com régua e bôia	21
6	- Parcela saturada coberta com plástico para estudo de <u>ar</u> mazenamento e redistribuição da água no perfil	21
7	- Subsolador	23
8	- Operação de subsolagem	23
9	- Perfil de umidade (% em massa) do solo estudado, 305 ho- ras após a saturação	40
10	- Umidade % em massa versus logarítmo natural do tempo, <u>a</u> pós a saturação (em horas) nas camadas 0-15 e 15-30 cm .	44
11	- Umidade % em massa versus logarítmo natural do tempo, <u>a</u> pós a saturação (em horas) nas camadas 30-45 e 45-60 cm .	45
12	- Umidade % em massa versus logarítmo natural do tempo, <u>a</u> pós a saturação (em horas) nas camadas 60-75 e 75-90 cm .	46

LISTA DE TABELAS

<u>Tabela</u>	<u>Página</u>
1 - Descrição dos perfis de solo	14
2 - Características químicas e físicas das várias camadas de solo	16
3 - Balanço hídrico segundo THORNTHWAITE (1955) - 125 mm - relativo ao ano de 1980	17
4 - Valores de condutividade hidráulica saturada	31
5 - Valores de condutividade hidráulica saturada obtidos para cada tratamento, em oito determinações (quatro em cada parcela)	33
6 - Teor de água em vários tempos e profundidades	36
7 - Regressões de $\bar{\theta}$ versus $\ln t$, para os quatro tratamentos e às seis profundidades	37
8 - Equações da condutividade hidráulica do solo em função de sua umidade, para as diversas profundidades	47
9 - Valores de $\bar{\gamma}$ para as camadas 0-45 e 0-90 cm, nos diversos tratamentos	48
10 - Umidade do solo (% em peso), na camada de 0-15 cm, em vários tempos, nos quatro tratamentos	57
11 - Umidade do solo (% em peso), na camada de 15-30 cm, em vários tempos, nos quatro tratamentos	58
12 - Umidade do solo (% em peso), na camada de 30-45 cm, em vários tempos, nos quatro tratamentos	59
13 - Umidade do solo (% em peso), na camada de 45-60 cm, em vários tempos, nos quatro tratamentos	60

<u>Tabela</u>	<u>Página</u>
14 - Umidade do solo (% em peso), na camada de 60-75 cm, em vários tempos, nos quatro tratamentos	61
15 - Umidade do solo (% em peso), na camada de 75-90 cm, em vários tempos, nos quatro tratamentos	62
16 - Regressões de $\theta_o - \theta$ versus $\ln t$, para as camadas de 0-15, 15-30, 30-45, 45-60, 60-75 e 75-90 cm	63
17 - Regressões de $\bar{\theta}_o - \bar{\theta}$ versus $\ln t$, para as camadas de 0-15, 0-30, 0-45, 0-60, 0-75 e 0-90 cm	64

INFLUÊNCIA DA SUBSOLAGEM E GRADAGEM DO SOLO NA DINÂMICA DA ÁGUA NO PERFIL

José Antonio Jorge

Paulo Leonel Libardi

Orientador

RESUMO

Relata-se, neste estudo, a influência de diferentes formas de manejo em solo cultivado com cana-de-açúcar, através da dinâmica da água no perfil do solo. O experimento foi realizado em Latossolo Roxo distrófico, no Município de Lençóis Paulista, no Estado de São Paulo. Utilizou-se, neste experimento, o método de LIBARDI *et alii* (1980) para a determinação da condutividade hidráulica no campo. Os tratamentos foram os seguintes: testemunha, subsolagem, subsolagem + gradagem média e subsolagem + gradagem pesada. Inicialmente, instalou-se em cada uma das duas parcelas de cada tratamento, uma armação circular de folha metálica com 0,40 m de altura por 4,00 m de diâmetro. Procedeu-se, a seguir, à saturação, colocando-se água nas parcelas por meio de uma mangueira ligada a um caminhão-pipa. Dentro de cada armação circular, colocaram-se quatro cilindros com 0,38 m de altura por 0,56 m de diâmetro, para medida da taxa de infiltração, em vários intervalos de tempo, até atingir uma taxa de infiltração constante. Em seguida à medição da infiltração vertical, retiraram-se as armações circulares e os cilindros e cobriram-se as parcelas com plásticos.

co preto, a fim de evitar a evaporação. Determinou-se, gravimetricamente, a umidade nas profundidades 0-15, 15-30, 30-45, 45-60, 60-75 e 75-90 cm, nos tempos de 60, 167, 215, 305 e 376 horas após a colocação da capa plástica, para os diversos tratamentos. Verificou-se a tendência, em termos médios, de uma maior velocidade de infiltração da água do solo no tratamento "subsolagem + gradagem média". No tocante à retenção de água, esta foi maior nos tratamentos submetidos à subsolagem, quer tenham recebido gradagens ou não. Este aumento de retenção foi observado nas amostragens a partir de 167 horas após a saturação. Considerando-se o tempo de 305 horas após a saturação, o teor de água nas várias profundidades foi maior nos tratamentos em que ocorreu a subsolagem seguida das gradagens média e pesada. Tendo em vista os altos coeficientes de determinação (maior que 0,8 para a maioria dos casos) obtidos nas regressões de umidade versus logaritmo natural do tempo de drenagem, o método de LIBARDI *et alii* (1980) mostrou ser satisfatório para obtenção da função $K(\theta)$, nas condições do experimento. Os resultados mostraram que para uma mesma variação de umidade, as variações de condutividade do solo para os tratamentos com implemento agrícola foram bem maiores do que para o tratamento testemunha.

THE INFLUENCE OF SUBSOILING AND DISKING ON SOIL PROFILE WATER DYNAMICS

José Antonio Jorge

Paulo Leonel Libardi

Adviser

SUMMARY

The influence of different tillage practices in a soil cropped with sugar cane was evaluated through water dynamics measurements. The experiment was carried out on a dystrophic dusky-red Latosol (Haplorthox), at Lençóis Paulista, São Paulo, Brazil. The method of LIBARDI *et alii* (1980) was utilized to determine the hydraulic conductivity soil-water content function. The treatments were as follows: control, subsoiling, subsoiling plus medium weight disk and subsoiling plus heavy disk. The measurements were performed using a circular metal framework, 0.4 m height and 4.0 m diameter, in order to pond water in the plots. Two plots of each treatment were then saturated and four metal cylinders 0.38 m height and 0.56 m diameter were pressed into the soil surface to determine the water infiltration rate. After measuring the vertical drainage, the framework and the cylinders were removed, and the plots covered with a plastic sheet to prevent evaporation. Moisture was determined at six different soil depths and at different times after plastic cover placement. Results showed, in average, an infiltration rate tendency to be

faster in the soil profile treated as subsoiling plus medium weight disk. Water retention was higher when the soils were subsoiled followed or not by disking; this happened when the samples were taken 167 hours after saturation. Considering the high determination coefficients (higher than 0.8 for most cases) obtained from moisture versus drainage time regressions, LIBARDI *et alii* (1980) method was considered satisfactory to determine the function $K(\theta)$ under the experiment conditions. Results showed that for the same soil water content variation, the soil hydraulic conductivity variation in treatments with tillage implement were much higher than in the control one.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação do homem em conhecer melhor o solo para cultivá-lo com a finalidade de extrair dele o seu alimento é muito antiga. Com o crescimento da população, o homem primitivo que vivia de frutas silvestres, caça e pesca, começou a voltar seus olhos à criação de animais domésticos e ao cultivo da terra. Há indicações de que mesmo antes do tempo do patriarca Abraão, por volta do ano 3000 a.C., o homem já revolveia a terra com o arado. Ao redor do ano 1500 a.C. os egípcios já se serviam do sistema de irrigação na cultura do trigo e da cevada. Os árabes, já em épocas remotas, faziam uso de terraços nas regiões montanhosas e, devido à precipitação irregular da Arábia, irrigavam suas culturas, notadamente o figo, o tamarindo e o café. Para isto, utilizavam a água captada em reservatórios nos períodos chuvosos (JORGE, 1983a).

O manejo correto dos solos agrícolas é de grande importância para manter ou aumentar sua produtividade reduzindo a erosão aos níveis mais baixos possíveis, e procurando manter suas características físicas e químicas em condições adequadas ao desenvolvimento e produção nor-

mais das culturas.

Na agricultura moderna, um dos problemas que tem aparecido com crescente frequência diz respeito à compactação do solo. Este problema tem se agravado sobremaneira com a constante movimentação de veículos e implementos agrícolas sobre o solo, durante as fases de aração, gradeação, plantio, adubação, pulverização e colheita. É útil lembrar que até 1940 um trator pesava, em média, menos que três toneladas, enquanto que as máquinas que trafegam, atualmente, por nossos solos cultivados, podem pesar mais de 25 toneladas, como acontece comumente com os caminhões e colhedoras carregadas (JORGE, 1983b).

No Brasil são escassos os trabalhos científicos relacionados com a compactação de solos, embora este problema já comece a causar sérias preocupações, principalmente nas culturas de cana-de-açúcar, café e soja.

Embora não obtendo excelentes rendimentos agrícolas quando comparados com outras regiões do mundo, o Brasil apresenta-se como o maior produtor de cana-de-açúcar. Com o programa de produção de álcool, a posição de liderança do Brasil deverá se acentuar, considerando-se a meta do PRO-ÁLCOOL de produzir, em 1985, cerca de 11 bilhões de litros de álcool.

O efeito da compactação do solo sobre a produtividade da cana-de-açúcar pode assumir grande importância em diversas situações de solo e manejo. Sua quantificação não foi ainda avaliada em detalhe, mas sabe-se que em condições extremas pode-se ter de 30 a 50% de queda de produção.

Os trabalhos de pesquisa neste assunto, realizados em outros países, nem sempre podem apresentar informações diretas para a solução destes problemas no Brasil, em virtude das condições de solo, clima, cultura e manejo diversos do nosso. Outro aspecto diz respeito à metodologia utilizada pela maioria dos pesquisadores, que se preocupam em medir a densidade global e a porosidade do solo para aferir o efeito da compactação dos solos.

Como a compactação afeta a condução de água no solo, pretende-se neste trabalho avaliar a eficiência de diferentes formas de manejo através da dinâmica da água no solo. Os efeitos da compactação e da subsolagem foram estudados através da mensuração da condutividade hidráulica do solo em função de sua umidade, e pela determinação do teor de água nas várias camadas do perfil, em vários tempos após a saturação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O homem percebeu, desde longo tempo, que sua convivência com a água era de suma importância para a produção agrícola. O homem aprenderia mais tarde que esta substância, indispensável aos seres vivos, faz parte de um ciclo que possibilita o seu reaproveitamento de forma infinita. BRUNINI (1975) salienta que o consumo de água por comunidades vegetais (evapotranspiração) e a água percolada pelo perfil do solo (drenagem interna) constituem duas importantes fases deste ciclo hidrológico.

A água, além de ser um composto essencial aos seres vivos, constituindo 95% da composição dos tecidos de algumas plantas, é ainda um meio indispensável para as reações químicas, físicas e biológicas do solo, atuando decisivamente no ecossistemas. A água influi, ainda, na temperatura ambiente, outro fator essencial aos seres vivos.

O estudo do comportamento da água no solo é muito complexo em virtude da grande heterogeneidade verificada no perfil de um solo, destacando-se a densidade global, o tamanho, a forma e a disposição de vazios, a textura, a estrutura, a superfície específica, o teor de matéria

orgânica, óxidos de ferro e outros fatores.

A fim de discutir as relações da água na agricultura, o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América dedicou, há quase três décadas, um anuário de agricultura para tratar somente deste assunto (USDA, 1955).

Os primeiros estudos teóricos do movimento da água em meios porosos são atribuídos a DARCY (1856), que trabalhou com filtros de areia sob condições de saturação. Mais tarde, BUCKINGHAM (1907), já trabalhando com solos, verificou que a equação proposta por Darcy também era válida para condições de não-saturação.

Na direção vertical, a equação de Darcy (solo saturado) pode ser escrita

$$q_o = -K_o \frac{d\psi_h}{dz} \dots\dots\dots (1)$$

onde: q_o = densidade de fluxo de água ($L.T^{-1}$)

K_o = condutividade hidráulica saturada (LT^{-1})

$d\psi_h/dz$ = gradiente de potencial hidráulico

ψ_h = potencial hidráulico (L) = somatória do potencial de pressão

(ψ_p) e potencial gravitacional (ψ_z)

z = coordenada vertical de posição (L).

Com o trabalho de BUCKINGHAM (1907), a equação de Darcy foi generalizada para

$$q = -K(\theta) \frac{d\psi_h}{dz} \dots\dots\dots (2)$$

que é conhecida pelo nome de equação de Buckingham-Darcy (SWARTZENDRUBER, 1966), cujos termos recebem a mesma denominação, com a diferença de que a condutividade hidráulica K é função da umidade Θ do solo e que o potencial hidráulico é a soma do potencial matricial com o gravitacional.

O sinal negativo das equações (1) e (2) é porque a densidade de fluxo de água e o gradiente de potencial hidráulico tem sentidos opostos.

A equação de Buckingham-Darcy combinada com a equação da continuidade leva à equação diferencial geral que rege o movimento da água no solo, conhecida pelo nome de equação de Richards, que, na dimensão vertical, se torna

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\Theta) \frac{\partial \psi_h}{\partial z} \right] \dots\dots\dots (3)$$

onde t = tempo.

WARKENTIN (1971), citando a equação de Poiseuille, salienta que o volume de água que flui por um tubo, por unidade de tempo, é proporcional à quarta potência do raio. Diminuindo pela metade o tamanho do tubo, diminui-se o fluxo por um fator de 16. Assim, pela compactação, diminuindo-se a dimensão dos vazios grandes, diminui-se a movimentação de água em solo saturado. Em solos não saturados, a relação entre a condutividade hidráulica e a porosidade é menos acentuada. Os grandes vazios estão cheios de ar e não contribuem para o fluxo de água, portanto, há um menor decréscimo em condutividade com um decréscimo na porosidade. Expe-

rimentalmente, o logarítmo da condutividade hidráulica de solo saturado aumenta linearmente à medida que a razão de vazios aumenta.

GERMANN e BEVEN (1981) enfatizam, estudando o fluxo de água nos macroporos do solo, que, embora se descreva o fluxo de água conforme descrito pela equação de RICHARDS (1931), tem-se verificado, no campo, a infiltração da água em condições diversas das consideradas na equação. Assim, a água pode fluir pelos poros grandes, parcialmente independente das condições hidráulicas nos pequenos poros, como ocorre nos canaliculos elaborados pelas minhocas (EHLERS, 1975).

NIELSEN *et alii* (1973), em abrangente trabalho sobre a variabilidade espacial das propriedades água-solo, enfatizaram que o teor de água tem distribuição normal com a profundidade, enquanto que os valores de condutividade hidráulica e difusividade da água do solo apresentam uma distribuição normal logarítmica. Dentre as determinações de laboratório utilizadas para prever o comportamento da água do solo, os autores destacam a curva de retenção e a condutividade hidráulica.

O manejo influi sobremaneira no comportamento da água no solo. BACCHI (1976), estudando os efeitos da compactação sobre o sistema solo-planta em cultura de cana-de-açúcar, concluiu que o revolvimento do solo a grandes profundidades (além de 1 m), apesar de ter proporcionado o maior desenvolvimento radicular, foi a condição que resultou em menor produção, provavelmente devido ao menor armazenamento de água que ocasionou na camada de 15 a 45 cm.

LIBARDI *et alii* (1979), fazendo uma análise da redistribui

ção da água tendo em vista a condutividade hidráulica do solo, em experimentos conduzidos em Piracicaba, concluíram que os valores de condutividade hidráulica saturada e não saturada para uma certa profundidade do solo, em condições de campo, podem ser calculados analiticamente a partir de medidas, durante experimentos de drenagem interna, de umidade (θ) e potencial hidráulico em função do tempo, para cada camada do perfil até esta profundidade.

LIBARDI *et alii* (1980) desenvolveram um método simples para medida da função $K(\theta)$, no qual a equação que relaciona K com θ é obtida facilmente pela medida apenas da umidade em função do tempo, na profundidade de interesse, durante a drenagem do solo após sua saturação e prevenção da evaporação através de sua superfície. Este método é o que foi utilizado neste trabalho e encontra-se descrito com detalhe no Capítulo 3 "Material e Método".

LINDSTROM e VOORHEES (1980) salientaram a influência da pressão das rodas dos cultivadores ("moldboard plow") nas entrelinhas, causando considerável redução na taxa de infiltração e maior facilidade de iniciar o escoamento. Os solos utilizados neste estudo foram de textura limo-argilosa, situados no cinturão do milho, nos Estados Unidos da América.

JOSE (1978) analisou a influência da compactação do solo no parâmetro difusividade da água em solo inicialmente seco, em colunas homogêneas, apresentando uma equação para cada tipo de solo, relacionando densidade global do solo com o coeficiente angular da curva da posição da frente de molhamento versus a raiz quadrada do tempo de infiltração.

MORGAN *et alii* (1966) compararam a velocidade de infiltração de água em solos barro-arenosos compactados e que receberam diversos corretivos físicos. A compactação diminuiu a velocidade de infiltração no solo que não recebeu o corretivo físico e naquele cujo corretivo foi o "peat" ("sphagnum peat moss"). Por outro lado, não ocorreu diminuição na velocidade de infiltração nos solos compactados, cujos corretivos físicos foram fitas de madeira (serragem), tratadas com ácido sulfúrico (restando principalmente a lignina) e com argila calcinada.

Vários autores estudaram a relação entre a compactação do solo e o comportamento das culturas. Entre nós, GROHMANN e QUEIROZ NETO (1966) compactaram artificialmente duas unidades de solo, o Latossolo Roxo e o Podzólico Vermelho Amarelo-Orto, utilizando um compactador Bruce mo dificado, a fim de determinar as relações entre a penetração das raízes do arroz e a densidade global do solo. Concluíram os autores, neste trabalho, que a faixa de compactação não prejudicial ao desenvolvimento do sistema radicular foi mais ampla no Latossolo Roxo do que no Podzólico Vermelho Amarelo-Orto. Assim, no primeiro, partindo da densidade global de $0,98 \text{ g/cm}^3$, no estado natural, o impedimento físico ao desenvolvimento do sistema radicular do arroz começou a ocorrer quando os valores da densidade global ultrapassaram $1,42 \text{ g/cm}^3$. No caso do Podzólico, partindo de uma densidade global de $1,32 \text{ g/cm}^3$, os problemas começaram a ocorrer a partir dos valores de $1,38 \text{ g/cm}^3$. Numa mesma linha de estudos, TROUSE (1965) verificou a influência da compactação do solo no desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar no Havaí, em solo de textura argilo-barrenta, notando que para as densidades globais de 1,04, 1,12, 1,20, 1,28, 1,36 e $1,44 \text{ g/cm}^3$ ocorreram, respectivamente, os seguintes cresci-

mentos de raízes, em cm/dia: 2,00, 1,73, 1,65, 1,36, 0,75 e 0,17.

COTE e DUPUIS (1980), estudando o efeito da subsolagem e da aração profunda sobre as propriedades físicas de um solo cultivado com alfafa e milho, concluíram que a subsolagem modificou as propriedades físicas do solo apenas nas profundidades de 50-70 cm onde o subsolador operou, e numa faixa de 10 cm de largura, não afetando, contudo, a produção de alfafa e milho. Os autores não observaram modificações na porosidade ou na permeabilidade das camadas mais profundas. Contudo, as modificações verificadas na região da subsolagem persistiram por mais de 3 anos.

SINGH *et alii* (1980) conseguiram diminuir as necessidades de água para o arroz, através da compactação do solo. Através da compactação, os autores diminuíram sensivelmente as perdas de água por percolação, perda esta que pode representar 60 a 80% do total de água aplicada.

REICHARDT (1971), estudando a infiltração da água em solos homogêneos, concluiu que o movimento da frente de molhamento é grandemente influenciado pela geometria do meio poroso durante o processo de infiltração da água. As várias sequências de poros determinam os teores de água em cada carga hidráulica, os quais, por sua vez, determinam os valores da condutividade hidráulica.

Ainda estudando o efeito da compactação e subsolagem em cultura de cana-de-açúcar, da variedade CB 41-76, em Latossolo Vermelho Escuro-fase argilosa, FERNANDES (1979) concluiu não haver efeito significativo tanto da compactação como da subsolagem no peso total das raízes,

notando, contudo, pequenas diferenças na distribuição do sistema radicular nos perfis do solo. Com referência à produção, esta foi maior nos tratamentos com os índices mais baixos de compactação.

Uma revisão completa sobre os diversos métodos de determinação da condutividade hidráulica sob condições de laboratório e de campo e detalhes da teoria dos trabalhos de LIBARDI *et alii* (1979 e 1980) podem ser encontrados em LIBARDI (1978).

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1. Solo

O experimento foi instalado na Fazenda São Joaquim, administrada pela Usina Barra Grande, em Lençóis Paulista, Estado de São Paulo, na latitude $22^{\circ}37'$, longitude $48^{\circ}47'$ e altitude de 480 m, no terço superior da encosta, em Latossol Roxo, distrófico, muito profundo, textura argilosa, formado a partir de material retrabalhado de rochas básicas, desenvolvido sobre basalto e pertencente à formação Serra Geral, num declive de cerca de 5% e em relevo suavemente ondulado (MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL, 1972).

A vegetação original era composta de mata, tendo sido substituída por cafeeiros e, nos últimos seis anos, por cana-de-açúcar, a qual foi erradicada antes da instalação deste experimento.

A descrição morfológica macroscópica dos perfis de solo acha-se na Tabela 1. A caracterização química e física dos solos estudados, para os quatro tratamentos, está contida na Tabela 2 e Figura 2. 0

balanço hídrico da região, segundo THORNTHWAITE e MATHER (1955), 125 mm, relativo ao ano de 1980, encontra-se na Tabela 3 e Figura 1.

3.2. Equipamentos

A fim de estudar a condutividade hidráulica do solo saturado e não-saturado pelo método de LIBARDI *et alii* (1980), utilizou-se uma armação circular de folha metálica, com 0,40 m de altura por 4,00 m de diâmetro (Figura 3). Dentro desta armação, instalaram-se quatro cilindros, também metálicos, com 0,38 m de altura por 0,56 m de diâmetro (Figuras 3 e 4). Fixado aos cilindros, numa das bordas, colocou-se uma régua graduada, na posição vertical, sobre a qual corria uma haste fixada numa bóia de isopor (Figura 5).

Para se estudar a redistribuição de água através do perfil, utilizou-se um plástico preto, para prevenir a evaporação da superfície do solo (Figura 6). As amostragens durante a drenagem para a determinação da umidade em várias profundidades foi efetuada com o auxílio de um trado.

A fim de suprir a água necessária para a saturação do solo e a medição da infiltração vertical, utilizou-se um caminhão tanque com a capacidade para 8000 litros de água.

TABELA 1 - Descrição dos perfis de solo.

Características	Testemunha	Subsolagem	Grad. Média	Grad. Pesada
<u>Horizonte Ap</u>				
Profundidade (cm)	0-20	0-20	0-22	0-20
Transição	Clara	Clara	Gradual	Gradual
Cor (úmida)	10R 3/3	2,5YR 3/3	2,5YR 3/3	2,5YR 3/3
Estrutura	Granular, Fraca, Pequena	Granular, Fraca, Pequena	Granular, Fraca, Pequena	Granular, Fraca, Muito Pequena
Consistência (úmida)	Muito Friável	Muito Friável	Muito Friável	Muito Friável
<u>Horizonte A3</u>				
Profundidade (cm)	20-48	20-32	22-40	20-35
Transição	Clara	Clara	Gradual	Gradual
Cor (úmida)	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4
Estrutura	Camada Adensada	Granular Moderada Média	Granular Fraca Pequena	Granular Fraca Pequena
Consistência (úmida)	Friável	Friável	Muito Friável	Muito Friável
Densidade Global (g/cm ³)	1,43	0,94	0,97	1,09
<u>Horizonte B1</u>				
Profundidade (cm)	48-77	32-60	40-70	35-60
Transição	Difusa	Difusa	Difusa	Difusa
Cor (úmida)	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4
Estrutura	Sub-Angular Fraca, Média	Sub-Angular Fraca, Pequena	Sub-Angular Fraca, Pequena	Sub-Angular Fraca, Média
Consistência (úmida)	Muito Friável	Muito Friável	Muito Friável	Muito Friável
Densidade Global (g/cm ³)	1,08	0,91	1,06	0,95

continua --

(continuação da Tabela 1)

Características	Testemunha	Subsolagem	Grad. Média	Grad. Pesada
<u>Horizonte B2</u>				
Profundidade (cm)	77-100	60-100	70-120	60-100
Cor (úmida)	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4
Estrutura	Sub-Angular Fraca, Pequena	Sub-Angular Fraca, Pequena	Maciço Poroso	Sub-Angular Fraca, Pequena
Consistência (úmida)	Muito Friável	Muito Friável	Solto	Muito Friável
<u>Camada</u>				
Profundidade (cm)	100-150	100-150	120-180	100-150
Cor (úmida)	2YR 3/4	2YR 3/4	2YR 3/4	2YR 3/4
<u>Camada</u>				
Profundidade (cm)	150-200	150-200	180-230	150-200
Cor (úmida)	2,5YR 3/4	2,5 YR 3/4	2,5 YR 3/4	2,5YR 3/4

TABELA 2 - Características químicas e físicas das várias camadas do solo.

Tratamento	Prof. (cm)	pH		Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Al ⁺³	H ⁺	C	Fe ₂ O ₃ (total)	Argila	Silte	Areia Grossa	Areia Fina
		H ₂ O	KCl											
----- meq/100g ----- % -----														
Test.	0-20	6,1	5,2	4,8	1,7	0,34	0	3,1	1,6	58	13	7	22	
	20-48	6	5,1	3,2	1,1	0,34	0,1	2,9	1,0	63	12	6	19	
	48-77	6,1	5,0	2,9	0,8	0,35	0,2	2,4	0,9	66	9	5	20	
	77-100	6,1	5,1	2,8	0,8	0,26	0	3,2	0,8	20,7	64	9	4	23
	100-150	5,7	4,8	2,3	0,7	0,09	0	2,6	1,3	65	9	5	21	
150-200	5,9	5,1	2,1	0,4	0,18	0,1	2,7	0,6	64	11	5	20		
Subs.	0-20	5,7	4,9	3,6	1,4	0,57	0,1	4,3	1,5	62	10	7	21	
	20-32	5,5	4,8	3,0	1,4	0,15	0,1	3,6	1,3	63	8	7	22	
	32-60	4,3	3,8	0,4	0,3	0,05	1,2	4,0	0,8	64	6	5	25	
	60-100	4,6	3,9	0,6	0,2	0,04	0,9	4,7	0,9	20,9	62	6	5	27
	100-150	4,6	4,0	0,3	0,1	0,02	0,9	4,2	0,7	67	8	4	21	
150-200	4,3	4,1	0,3	0,1	0,02	0,6	3,5	0,5	65	7	6	22		
Sub + GP	0-20	5,9	5,3	4,9	2,0	0,95	0,1	3,0	1,6	60	10	7	23	
	20-35	5,0	4,3	1,8	0,9	0,21	0,1	4,1	1,1	62	11	6	21	
	35-60	4,7	4,0	0,7	0,5	0,10	0,6	3,4	0,8	64	11	4	21	
	60-100	4,5	4,0	0,4	0,2	0,04	1,2	4,4	0,8	21,6	67	4	23	
	100-150	4,5	4,0	0,2	0,1	0,05	1,1	4,8	0,9	68	6	4	22	
150-200	4,3	4,1	0,2	0,1	0,05	0,7	4,3	0,6	63	10	5	22		
Sub + GM	0-20	5,9	5,1	3,6	1,7	1,2	0,2	3,3	1,5	58	12	7	23	
	20-70	5,1	4,4	1,2	0,6	0,13	0,2	3,6	0,8	65	7	4	24	
	70-120	4,7	4,1	0,9	0,2	0,04	0,6	4,6	0,9	22,2	63	4	20	
	120-180	4,7	4,0	0,4	0,1	0,04	0,8	4,3	0,7	65	8	5	22	

TABELA 3 - Balanço hídrico segundo THORNTHWAITE e MATHER (1955) - 125 mm, relativo ao ano de 1980.

Meses	Temp. °C (média)	----- mm -----					
		EP	P	ARM	ER	DEF	EXC
Janeiro	25,3	135	224	125	135	0	89
Fevereiro	27,3	142	325	125	142	0	183
Março	27,8	151	100	82	143	8	0
Abril	26,3	127	129	84	127	0	0
Maió	21,8	71	21	56	49	22	0
Junho	17,9	40	79	95	40	0	0
Julho	19,8	53	0	62	33	20	0
Agosto	21,3	68	13	40	35	33	0
Setembro	19,8	57	67	50	57	0	0
Outubro	24,8	121	60	30	80	41	0
Novembro	25,8	139	155	46	139	0	0
Dezembro	26,3	154	353	125	254	0	120
Ano	23,7	1258	1526		1134	124	392

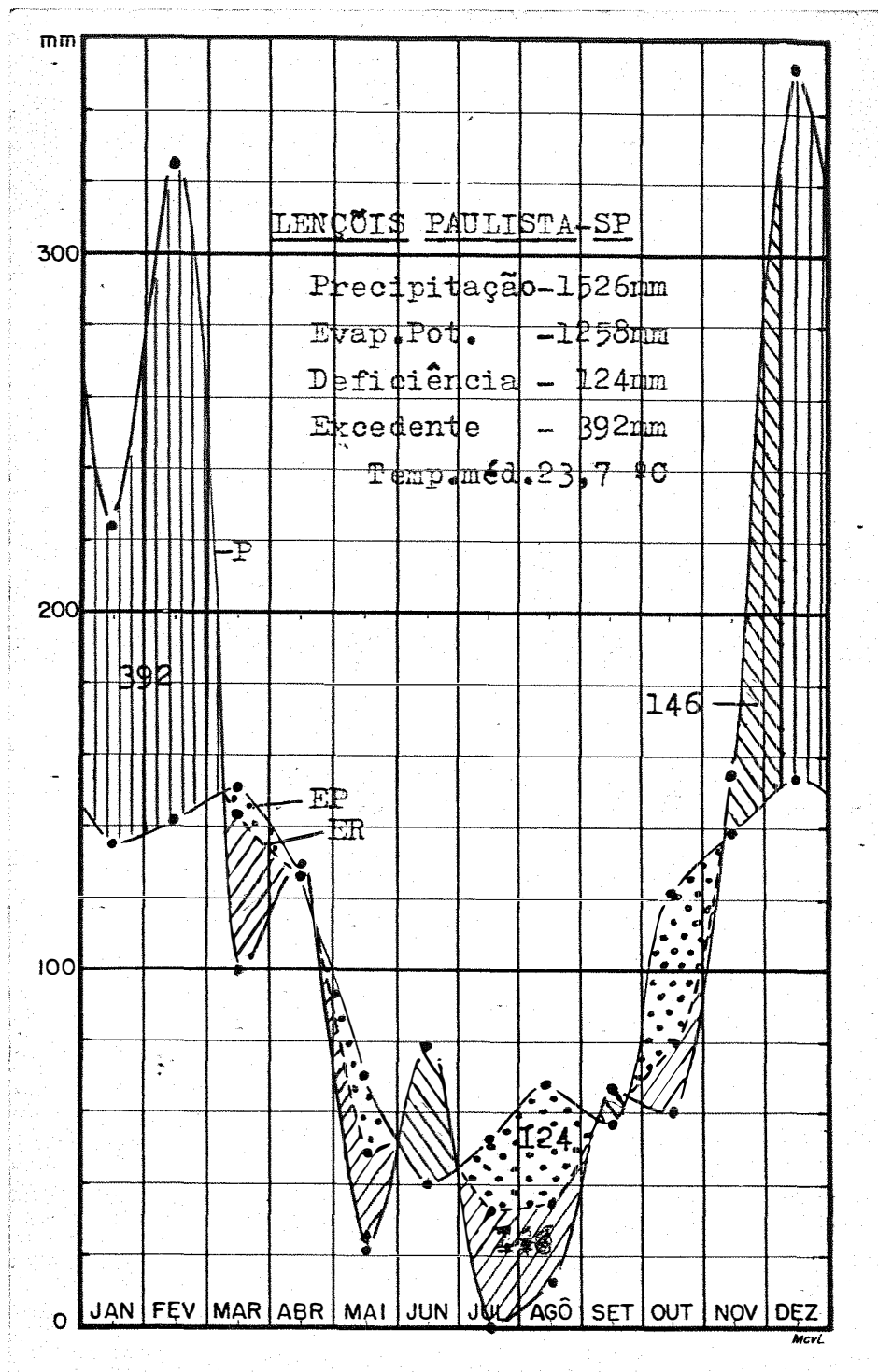


FIGURA 1 - Balanço hídrico segundo THORNTHWAITTE e MATHER (1955), 125 mm, relativo ao ano de 1980.

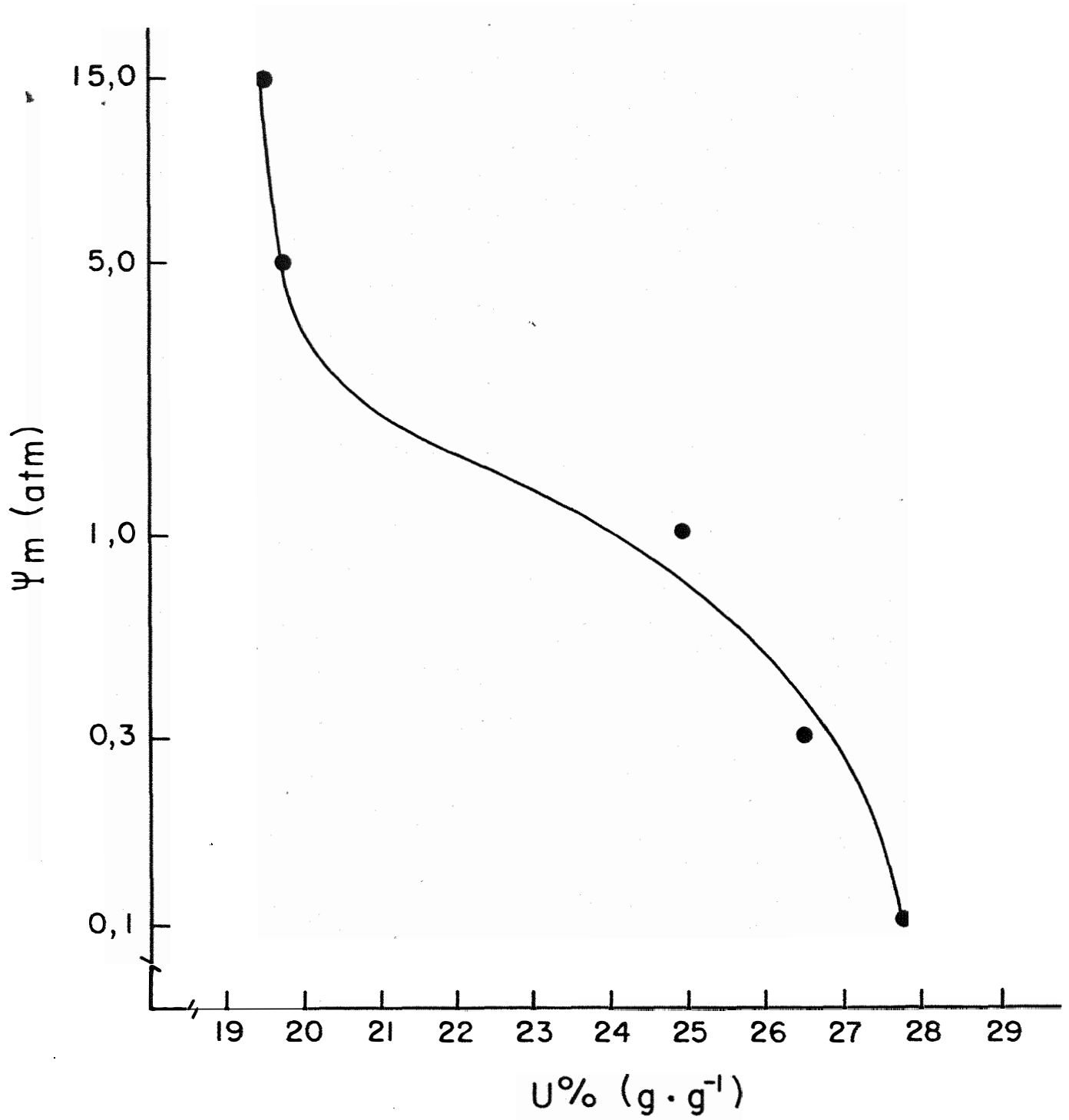


FIGURA 2 - Curva característica da umidade do solo estudado.



FIGURA 3 - Saturação do solo e instalação dos equipamentos.



FIGURA 4 - Cilindros metálicos.



FIGURA 5 - Cilindro com rêgua e bôia.



FIGURA 6 - Parcela saturada coberta com plãstico, para estudo de armazenamento e redistribuiçãõ da água no perfil.

3.3. Tratamentos utilizados

Como já salientamos, o método utilizado para obtenção da relação entre a condutividade hidráulica do solo e sua umidade, foi o método de LIBARDI *et alii* (1980).

Para tanto, instalou-se a armação circular de folha metálica sobre cada parcela a ser estudada até uma profundidade de 10 cm abaixo da superfície do solo, chegando-se uma pequena porção de terra nas faces internas e externas da parede, a qual foi, em seguida, bem compactada, a fim de evitar vazamento de água durante a saturação do perfil.

Inundou-se, então, a área interna da armação metálica, com auxílio de caminhões tanques, até obtenção de uma condição de equilíbrio dinâmico ("steady state"); neste estágio, manteve-se o nível da água a cerca de 5 cm abaixo da borda superior do círculo; distribuíram-se no seu interior quatro cilindros, munidos de régua e bôia para a medida da condutividade hidráulica saturada K_o . Estes cilindros foram enchidos com água por várias vezes, enquanto se media o decréscimo da altura da lâmina de água, até se obter o valor de K_o .

O procedimento acima descrito foi feito em duas repetições, com quatro observações cada, nos tratamentos:

a) Testemunha: parcela onde foi erradicada a cana-de-açúcar após um ciclo de seis anos, sem nenhuma intervenção de implementos agrícolas, exceto a gradagem com grade de peso médio;

b) Subsolagem: parcela igual à testemunha, porém onde se realizou uma subsolagem a cerca de 45 cm de profundidade (Figuras 7 e 8);



FIGURA 7 - Subsolador.



FIGURA 8 - Operação de subsolagem.

c) Subsolagem mais gradagem média: parcela que recebeu o tratamento igual ao "b", acrescido de uma gradagem com equipamento de peso médio. A grade empregada apresentava 24 discos de 30 polegadas de diâmetro, com uma distância de 320 mm entre os discos, uma largura de corte de 4,30 m e peso total de 3000 kg;

d) Subsolagem mais gradagem pesada: parcela que recebeu o tratamento igual ao "b", acrescido de uma gradagem com equipamento pesado. A grade empregada apresentava 16 discos de 34 polegadas de diâmetro, com uma distância de 450 mm entre os discos, uma largura de corte de 3,60 m e peso total de 4500 kg.

A subsolagem referida nos itens "b", "c" e "d" foram efetuadas com um subsolador apresentando em suas hastes duas aletas, conforme demonstra a Figura 7.

Tanto a subsolagem como as gradagens foram executadas apenas uma vez, em cada tratamento, e no sentido perpendicular ao declive.

Terminada a determinação de K_o , retiraram-se o círculo e os cilindros, cobrindo-se toda a parcela com um plástico preto para evitar a evaporação ou infiltração de água da chuva através da superfície.

Para cada tratamento, colheram-se oito amostras de solo nas camadas de 0-15, 15-30, 30-45, 45-60, 60-75 e 75-90 cm, nos períodos de 60, 167, 215, 305 e 376 horas após a cobertura da superfície das parcelas com as capas plásticas.

As determinações de umidade foram feitas gravimetricamente.

Este experimento foi efetuado nos meses de outubro e novembro de 1980.

O delineamento estatístico utilizado foi de blocos inteiramente casualizados.

A determinação da cor úmida do solo foi feita com a tabela de cores japonesa (FUJIHARA INDUSTRY COMPANY, 1966).

3.4. Método de LIBARDI *et alii* (1980)

Com este método, sob condições transientes, procura-se dar uma solução à equação de Richards (equação 3). Para tanto, após a saturação de um perfil de solo e prevenção da evaporação através de sua superfície, as seguintes condições inicial e de contorno podem ser utilizadas durante o processo de redistribuição:

$$\theta = \theta_s \quad , \quad t = 0 \quad , \quad z > 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\theta = \theta_i \quad , \quad t > 0 \quad , \quad z \rightarrow \infty \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$q = 0 \quad , \quad t > 0 \quad , \quad z = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

onde θ_i = umidade inicial do solo (antes de sua saturação).

A condição (6) é conseguida por meio de cobertura da superfície do solo com uma capa plástica no tempo $t=0$ de redistribuição.

Assim, integrando-se a equação (3) com relação à profundidade z , desde a superfície a uma profundidade z do solo, obtêm-se:

$$\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = \int_0^z \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial \psi_h}{\partial z} \right] dz$$

ou

$$\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = \left[K(\theta) \frac{\partial \psi_h}{\partial z} \right]_{z=z} - \left[K(\theta) \frac{\partial \psi_h}{\partial z} \right]_{z=0}$$

a qual, pela condição (6), se torna:

$$\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = K(\theta) \frac{\partial \psi_h}{\partial z} \dots\dots\dots (7)$$

A maneira usual de se resolver a integral da equação (7) é tomar a umidade média até a profundidade z, de tal maneira que

$$z \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \left[K(\theta) \frac{\partial \psi_h}{\partial z} \right]_{z=z} \dots\dots\dots (8)$$

uma vez que o primeiro membro da equação (7) representa a taxa da variação de armazenamento de água no perfil de solo até a profundidade z.

Assume-se, neste método, que a umidade média $\bar{\theta}$ desde $z=0$ a $z=z$ e a umidade θ numa profundidade particular z seguem a relação linear a seguir:

$$\theta = a\theta + b \dots\dots\dots (9)$$

onde a e b são constantes.

Nestas condições, a derivação da equação (9) com relação ao tempo fornece

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = a \frac{\partial \theta}{\partial t} \dots\dots\dots (10)$$

Substituindo a equação (10) na equação (8):

$$az \frac{\partial \theta}{\partial t} = K(\theta) \frac{\partial \psi_h}{\partial z} \dots\dots\dots (11)$$

O método também assume que $\partial \psi_h / \partial z = -1$ e que K está relacionado com θ pela expressão:

$$K = K_0 e^{\gamma(\theta - \theta_0)} \dots\dots\dots (12)$$

onde γ é uma constante e K_0 e θ_0 os valores de K e θ durante a infiltração em "steady state", respectivamente.

Nestas condições, a equação (11) se torna:

$$a.z. \frac{\partial \theta}{\partial t} = -K_0 e^{\gamma(\theta - \theta_0)} \dots\dots\dots (13)$$

A integração da equação (13) para uma dada profundidade z desde a condição inicial $\theta = \theta_0$, $t = 0$ até $\theta = \theta$, $t = t$, resulta em

$$\theta = \theta_0 - \frac{1}{\gamma} \ln \left(1 + \frac{\gamma K_0}{az} t \right) \dots\dots\dots (14)$$

que $\tilde{\theta}$ é a equação que nos possibilita verificar como a umidade do solo varia com o tempo em cada profundidade, em experimentos de redistribuição de água no solo onde se previne a evaporação.

Uma equação similar à equação (14) pode ser escrita para variações de $\bar{\theta}$ com o tempo:

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_o - \frac{1}{\gamma} \ln \left(1 + \frac{\bar{\gamma}K_o}{z} t \right) \dots\dots\dots (15)$$

de maneira que

$$a = \frac{\gamma}{\bar{\gamma}} \dots\dots\dots (16)$$

Para tempos longos, as equações (14) e (15) se tornam, respectivamente:

$$\theta = \theta_o - \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\gamma K_o}{az} t \right) \dots\dots\dots (17)$$

e

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_o - \frac{1}{\bar{\gamma}} \ln \left(\frac{\bar{\gamma}K_o}{z} t \right) \dots\dots\dots (18)$$

o que indica que $(\theta_o - \theta)$ e $(\bar{\theta}_o - \bar{\theta})$ estão linearmente relacionados com $\ln t$.

O coeficiente angular de $(\theta_o - \theta)$ versus $\ln t$ é igual a $1/\gamma$ e, através do coeficiente linear, pode-se medir K_o , desde que a cons-

tante \underline{a} seja conhecida. No entanto, a partir da equação (16):

$$\bar{\gamma} = \frac{\gamma}{a}$$

Logo, calculando-se $\bar{\gamma}$ a partir da equação (18), o valor de K_0 pode ser calculado a partir da equação (17) (o coeficiente linear em $t=1$), para cada profundidade sem se conhecer explicitamente o valor de \underline{a} . Observe também que tais estimativas de γ e K_0 a partir da equação (17) podem ser usadas na equação (15) a fim de que se obtenha uma expressão analítica válida para todos os tempos.

Portanto, com os valores de K_0 e γ , a relação $K(\theta)$ pode ser obtida automaticamente de acordo com a equação (12).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Velocidade de infiltração

Como descrito no item 3.4., durante a infiltração da água no solo, mediu-se sua velocidade de infiltração através dos cilindros munidos de bôia e régua. Atingida a condição de equilíbrio dinâmico, obteve-se, conseqüentemente, os valores de condutividade hidráulica saturada para a camada superficial em cada um dos tratamentos. Os resultados deste parâmetro encontram-se na Tabela 4, juntamente com os valores de condutividade hidráulica saturada depreendidos do método de LIBARDI *et alii* (1980), que serão discutidos posteriormente.

Analisando os valores de K_0 determinados constantes da Tabela 4, pode-se verificar que houve variações entre os tratamentos. Em relação à testemunha, pode-se notar que a gradagem pesada em nada influenciou o valor de K_0 . Já com relação à gradagem média, esta aumentou o valor deste parâmetro de 0,17 a 0,24 cm/min, enquanto que a subsolagem o diminuiu de 0,17 a 0,11 cm/min.

TABELA 4 - Valores de condutividade hidráulica saturada (K_0) (a) determinados a partir da medida da taxa de infiltração em condição de equilíbrio dinâmico; (b) calculados a partir do método de LIBARDI *et alii* (1980), para as diversas profundidades (z).

Tratamento	K_0 Determinado (cm/min)	K_0 Calculado (cm/min)					
		z=15cm	z=30cm	z=45cm	z=60cm	z=75cm	z=90cm
Testemunha	0,17	0,31	0,60	0,93	1,24	1,53	1,85
Subsolagem	0,11	0,16	0,20	0,31	0,72	0,93	1,23
Grad. Média	0,24	0,15	0,27	0,34	0,45	0,61	0,80
Grad. Pesada	0,18	0,12	0,26	0,41	0,53	0,66	0,82

Apesar de, pela análise dos valores médios, perceber-se diferenças entre os tratamentos, isto não reflete muito a realidade, tendo em vista os coeficientes de variação obtidos, mostrados na Tabela 5. Assim, para o tratamento testemunha, o valor de K_0 variou de 0,0136 a 0,00414 cm/seg, enquanto que para o tratamento subsolagem + gradagem média (o que mais diferiu da testemunha) variou de 0,00236 a 0,00556 cm/seg. Isto mostra que, embora o tratamento subsolagem + gradagem média apresente uma tendência de aumentar o valor de K_0 em relação à testemunha, na realidade não se pode afirmar categoricamente que isto seja verdadeiro, uma vez que a faixa de variação dos valores de K_0 dos dois tratamentos se sobrepõem, e também porque em estudos de variabilidade espacial, REICHARDT *et alii* (1976), em Terra Roxa Estruturada, obtiveram variações no valor de K_0 de mais de 100% numa mesma parcela de 5m x 5m.

De qualquer maneira, aliando-se as operações de subsolagem e gradagem, obteve-se, neste trabalho, uma tendência de maior velocidade de infiltração no tratamento subsolagem mais gradagem média, porquanto dentro deste aspecto de infiltração, pode-se dizer que, até que estudos mais pormenorizados comprovem o uso de grades pesadas, é preferível optar-se pela gradagem média.

4.2. Condutividade hidráulica saturada, calculada a partir do método de LIBARDI *et alii* (1980)

A partir das análises de regressão linear entre θ versus $\ln t$ e $\bar{\theta}$ versus $\ln t$ (equações 17 e 18 do item 3.3.), obtiveram-se os valores de K_0 para as seis profundidades estudadas que se encontram dispostos

TABELA 5 - Valores de condutividade hidráulica saturada, obtidos para cada tratamento, em 8 determinações (4 em cada parcela), em cm/seg.

	Repetições								Média	s	cv (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8			
0,00291	0,00330	-	0,00299	0,00136	0,00392	0,00413	0,00139	0,00286	0,001025	38,7	
0,00178	0,00191	0,00151	0,00182	0,00194	0,00200	0,00161	0,00162	0,00177	0,000166	10,0	
0,00347	0,00403	0,00361	0,00472	0,00319	0,00236	0,00556	0,00458	0,00394	0,000938	25,4	
0,00167	0,00319	0,00306	0,00194	0,00280	0,00380	0,00360	0,00420	0,00303	0,000822	29,0	

s = desvio padrão

cv = coeficiente de variação

na Tabela 4. Para a obtenção destes valores, é indispensável o valor da umidade do solo no tempo zero de drenagem, isto é, no tempo em que após a infiltração, a superfície do solo é coberta com a capa de plástico. Como esta umidade não foi determinada neste instante, os valores de θ_0 foram estimados por extrapolação da curva de θ versus $\ln t$, para $t = 1$ hora. Evidentemente, devido a isto, torna-se difícil comparar os valores de K_0 determinados e os calculados para a camada superficial do solo nos diversos tratamentos. No entanto, entre os tratamentos, estes valores extrapolados de K_0 podem ser comparados, visto que o critério de sua obtenção foi o mesmo em todos os tratamentos. Nota-se assim que para todos os tratamentos, os valores de K_0 calculados são crescentes com a profundidade. Já entre os tratamentos, para a camada 0-15 cm, seus valores decrescem da testemunha para a gradagem pesada. Para as camadas de 15-30 cm e de 30-45 cm observa-se uma diminuição no tratamento subsolagem em relação à gradagem média e a gradagem pesada. Para as últimas três camadas (45-60, 60-75 e 75-90 cm), o fenômeno se inverte, isto é, existe um decréscimo mais acentuado no tratamento gradagem média. Vale a pena ressaltar também que, com exceção das profundidades 60-75 e 75-90 cm, os valores de K_0 calculados caíram praticamente pela metade em relação à testemunha.

Os valores de θ_0 para o tempo de drenagem igual a 1 hora obtidos por extrapolação da curva de θ versus $\ln t$, se encontram nas equações de regressão da Tabela 7.

Apenas como exemplo, tomemos a profundidade 0-15 cm. Enfoques semelhantes podem ser feitos com as outras camadas. Pode-se observar que os valores de θ_0 para esta camada são praticamente os mesmos ($\approx 32\%$)

para os tratamentos com subsolagem, e maior (37%) para o tratamento testemunhu. Por outro lado, pela Tabela 4, os valores de K_0 calculados nesta profundidade decrescem na seguinte ordem: testemunhu, subsolagem, subsolagem + gradagem média e subsolagem + gradagem pesada; mas nota-se também que a grande diferença se encontra na testemunhu em relação aos demais. Como os valores de umidade são à base de massa e, lembrando que a umidade à base de volume é igual ao produto da umidade à base de massa pela densidade relativa (relação entre a densidade global do solo e a densidade da água) e lembrando ainda que para um mesmo meio poroso a condutividade hidráulica é diretamente relacionada à umidade à base de volume, isto é, quanto maior esta umidade maior o valor de K, depreende-se facilmente que deve ter havido diminuição da densidade global do solo também na ordem testemunhu, subsolagem, subsolagem + gradagem média e subsolagem + gradagem pesada, com uma diferença mais acentuada para os tratamentos com subsolagem em relação à testemunhu.

4.3. Teor de água no perfil de solo

Na Tabela 6 acham-se os dados do teor de água em vários tempos e profundidades, verificados nos quatro tratamentos, após a cobertura do solo com a capa plástica.

Os dados tabulados na Tabela 6 são média de oito repetições, para cada tratamento, em cada tempo e profundidade considerados. Os dados relativos a cada repetição constam das Tabelas 10 a 15, no Apêndice.

Pelo teste de Tukey, pode-se tirar as seguintes conclusões:

TABELA 6 - Teor de água em vários tempos e profundidades (média de oito repetições)¹

Prof.	Δ^2	Tratamento ³	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
			----- g de água / 100 g de solo -----				
0-15		testemunha	28,4	26,0	26,0	24,6	24,7
		subsolagem	27,4	25,8	25,8	25,2	25,7
		sub + gm	28,1	27,5	27,3	26,6	26,2
		sub + gp	28,3	27,8	26,9	27,4	26,5
	Δ		2,1	1,8	2,3	1,4	1,4
15-30		testemunha	28,0	26,0	25,2	24,9	24,4
		subsolagem	27,6	27,0	27,2	27,5	26,8
		sub + gm	27,9	27,2	28,5	26,2	26,4
		sub + gp	28,5	27,4	27,6	27,4	26,4
	Δ		1,5	1,5	1,8	1,6	1,8
30-45		testemunha	29,2	27,1	26,2	26,0	24,8
		subsolagem	28,7	28,1	27,7	28,5	26,8
		sub + gm	28,1	28,1	28,3	27,4	27,6
		sub + gp	28,4	27,7	27,6	27,5	26,2
	Δ		1,6	1,1	2,5	1,6	1,5
45-60		testemunha	29,6	28,1	27,2	26,7	25,6
		subsolagem	30,7	29,0	27,7	27,6	26,4
		sub + gm	28,9	28,5	28,8	27,5	27,5
		sub + gp	28,8	28,1	28,6	27,8	26,7
	Δ		1,6	1,1	1,8	1,4	1,7
60-75		testemunha	30,1	27,7	27,6	26,8	25,8
		subsolagem	30,1	28,5	27,0	27,4	26,4
		sub + gm	30,0	29,2	28,6	28,3	28,3
		sub + gp	29,6	28,7	28,5	28,5	27,8
	Δ		1,3	1,5	2,0	1,3	1,4
75-90		testemunha	30,2	28,0	27,7	27,0	25,9
		subsolagem	31,1	28,4	27,7	27,5	26,9
		sub + gm	30,7	29,6	28,2	28,4	28,4
		sub + gp	30,3	29,1	28,7	29,1	27,8
	Δ		1,1	1,6	1,8	1,3	1,1

¹Os dados relativos a cada repetição acham-se no Apêndice. Tempos em horas: $t_1 = 60$; $t_2 = 167$; $t_3 = 215$; $t_4 = 305$; $t_5 = 376$.

²Teste de Tukey; desvio mínimo significativo ao nível de 5%.

³sub + gm = subsolagem + gradagem média; sub + gp = subsolagem + gradagem pesada.

TABELA 7 - Regressões de θ versus $\ln t$, para os quatro tratamentos e as seis profundidades, obtidas a partir dos dados da Tabela 6.

Profundidade	Tratamento ¹	θ	a	b	R^2
0 - 15 cm	testemunha	$\theta = 37,060 - 2,123 \ln t$			0,96
	subsolagem	$\theta = 31,518 - 1,069 \ln t$			0,85
	sub + gm	$\theta = 32,372 - 0,994 \ln t$			0,87
	sub + gp	$\theta = 31,569 - 0,802 \ln t$			0,72
15 - 30 cm	testemunha	$\theta = 36,055 - 1,978 \ln t$			0,99
	subsolagem	$\theta = 28,745 - 0,287 \ln t$			0,39
	sub + gm	$\theta = 31,548 - 0,840 \ln t$			0,53
	sub + gp	$\theta = 32,377 - 0,937 \ln t$			0,81
30 - 45 cm	testemunha	$\theta = 38,359 - 2,226 \ln t$			0,96
	subsolagem	$\theta = 32,037 - 0,792 \ln t$			0,81
	sub + gm	$\theta = 30,484 - 0,477 \ln t$			0,55
	sub + gp	$\theta = 32,415 - 0,937 \ln t$			0,70
45 - 60 cm	testemunha	$\theta = 37,603 - 1,972 \ln t$			0,95
	subsolagem	$\theta = 39,936 - 2,229 \ln t$			0,93
	sub + gm	$\theta = 32,586 - 1,738 \ln t$			0,68
	sub + gp	$\theta = 32,700 - 0,896 \ln t$			0,60
60 - 75 cm	testemunha	$\theta = 39,044 - 2,174 \ln t$			0,97
	subsolagem	$\theta = 38,250 - 1,984 \ln t$			0,93
	sub + gm	$\theta = 34,078 - 0,991 \ln t$			0,96
	sub + gp	$\theta = 33,254 - 0,891 \ln t$			0,95
75 - 90 cm	testemunha	$\theta = 39,196 - 2,180 \ln t$			0,97
	subsolagem	$\theta = 40,240 - 2,268 \ln t$			0,98
	sub + gm	$\theta = 36,279 - 1,376 \ln t$			0,85
	sub + gp	$\theta = 34,923 - 1,129 \ln t$			0,81

¹ sub + gm = subsolagem + gradagem média

sub + gp = subsolagem + gradagem pesada

a) Para o tempo t_1 (60 horas), não ocorreram diferenças significativas de teor de água entre os tratamentos, em todas as profundidades, exceto na profundidade 45-60 cm em que o tratamento "subsolagem", com maior teor de água, mostrou diferenças significativas a 5% em relação aos demais tratamentos, não diferindo, contudo, do tratamento "testemunha".

b) Para o tempo t_2 (167 horas), as diferenças significativas ao nível de 5% ocorreram da seguinte forma, sendo maior do que na testemunha: tratamento "subsolagem", em três profundidades (0-15, 30-45 e 45-60 cm); tratamento "subsolagem + gradagem pesada", em duas profundidades (0-15 e 60-75 cm); tratamento "subsolagem + gradagem média", em apenas uma profundidade (60-75 cm).

c) Para o tempo t_3 (215 horas), verificaram-se as seguintes diferenças significativas a 5%, sendo maior em relação à testemunha: nas cinco profundidades, indo de 15 a 90 cm para o tratamento "subsolagem + gradagem pesada"; nas profundidades de 15-30 e 30-45 cm para o tratamento "subsolagem + gradagem média", e apenas na profundidade de 15-30 cm para o tratamento "subsolagem".

d) Para o tempo t_4 (305 horas), ocorreram as seguintes diferenças significativas a 5%, sendo maior em relação à testemunha: em quatro profundidades (0-15, 15-30, 60-75 e 75-90 cm) para o tratamento "subsolagem + gradagem pesada"; em três profundidades (0-15, 60-75 e 75-90 cm) para o tratamento "subsolagem + gradagem média"; em duas profundidades (15-30 e 30-45 cm) para o tratamento "subsolagem".

O teor de água neste tempo, conforme demonstra a Figura 9,

é maior nas várias profundidades, nos tratamentos "subsolagem + gradagem média" e "subsolagem + gradagem pesada".

e) Para o tempo t_5 (376 horas), o mais prolongado deste estudo, nas três profundidades superficiais (0-15, 15-30 e 30-45 cm), o teor de água foi significativamente maior do que a testemunha, ao nível de 5% nos tratamentos "subsolagem", "subsolagem + gradagem média" e "subsolagem + gradagem pesada"; na profundidade 40-60 cm, só foi significativamente maior o teor de água no tratamento "subsolagem + gradagem média" e nas duas últimas profundidades (60-75 e 75-90 cm) o teor de água encontrado foi mais alto nos dois tratamentos com subsolagem seguida de gradagem.

Por esta análise, pode-se dizer que nos diversos tempos, tem-se um comportamento diferente para cada tratamento no que diz respeito ao teor de água retido pelo solo, dependendo da profundidade considerada.

Em todos os casos, os tratamentos "subsolagem", "subsolagem + gradagem média" e "subsolagem + gradagem pesada" apresentaram maior quantidade de água retida do que o tratamento "testemunha".

Tomando-se a profundidade 0-45 cm, ou seja, a faixa de solo atingida pelo subsolador, não ocorreu diferença significativa entre os teores de água nos tratamentos "subsolagem", "subsolagem + gradagem média" e "subsolagem + gradagem pesada". Contudo, levando-se em consideração toda a faixa do perfil estudado, isto é, de 0 a 90 cm, o maior teor de água se deu em 43% dos casos para o tratamento "subsolagem + gradagem pesada", em 33% dos casos para o tratamento "subsolagem + gradagem média", e

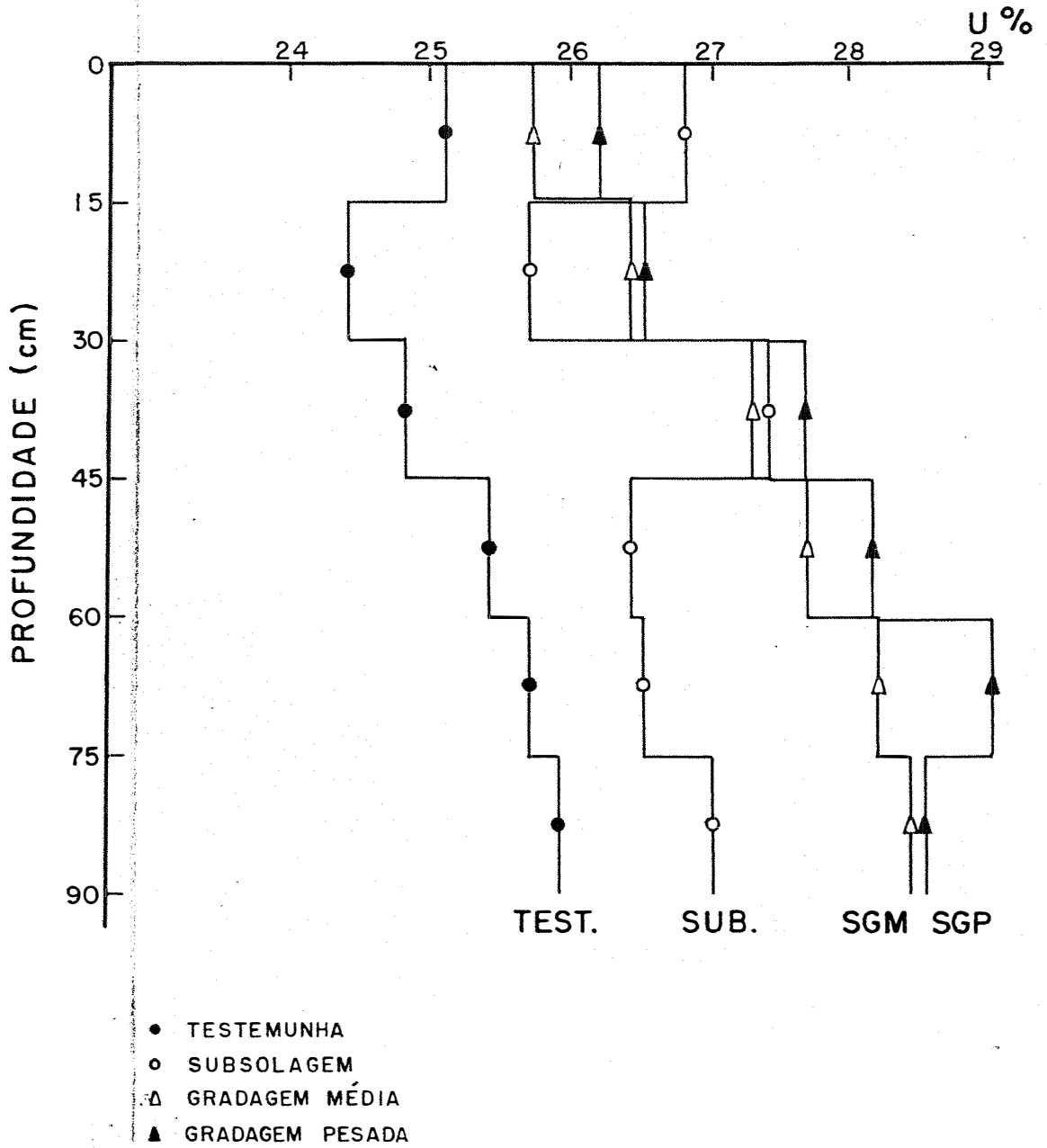


FIGURA 9 - Perfil de umidade (U%) do solo estudado, 305 horas após a saturação.

apenas em 24% dos casos para o tratamento "subsolagem".

4.4. Regressões de umidade (θ) versus logaritmo natural do tempo de drenagem ($\ln t$)

Na Tabela 7 e Figuras 10, 11 e 12 acham-se os valores de umidade por cento em massa θ (média de oito repetições) em função de $\ln t$, para os quatro tratamentos e as seis profundidades estudadas. Como se pode observar, os coeficientes de determinação foram relativamente altos, acima de 0,80 para a maioria das regressões, exceção do tratamento "subsolagem" na profundidade 15-30 cm, onde foi de 0,39. Provavelmente, algum problema deve ter ocorrido que não nos foi possível detectar. Com estes resultados pode-se dizer que a metodologia descrita por LIBARDI *et alii* (1980), constante no item 3.3., pode perfeitamente ser aplicada para este estudo. Pelas retas das Figuras 10, 11 e 12 pode-se dizer que em praticamente todos os casos os tratamentos com gradagem seguida de subsolagem apresentam teores mais elevados de água, principalmente à medida que aumentava o tempo de drenagem.

4.5. Condutividade hidráulica em função da umidade

Seguindo a metodologia de LIBARDI *et alii* (1980), obteve-se para cada profundidade e para cada um dos tratamentos, as equações de K versus θ (= umidade % em massa), que podem ser vistas na Tabela 8. As Tabelas 16 e 17 do Apêndice apresentam as regressões de $\theta_0 - \theta$ versus $\ln t$

e $\bar{\theta}_0 - \bar{\theta}$ versus $\ln t$ para a obtenção de γ e $\bar{\gamma}$, respectivamente. O parâmetro γ destas equações (ver equação 12 do item 3.3.) nos dá uma indicação da magnitude de variação de K com a variação de θ . Assim, por facilidade de análise, apresentamos o valor médio de γ para a camada 0-45 cm e o valor médio de γ para todo o perfil, nos diversos tratamentos, na Tabela 9. Observa-se, por essa tabela que, em relação à testemunha, na camada 0-45 cm de profundidade, os demais tratamentos apresentaram grande variação no valor de $\bar{\gamma}$, sendo a maior encontrada na subsolagem, indicando, portanto, que para uma mesma variação de umidade, a variação de condutividade é bem maior nos tratamentos que receberam implemento agrícola, do que aquele que não recebeu (testemunha). Analisando todo o perfil (0 a 90 cm), o mesmo fenômeno ocorre de uma maneira um pouco mais branda, apresentando maior diferença em relação à testemunha o tratamento "gradagem média", indicando que este tratamento teve maior influência em profundidade.

Os efeitos da subsolagem e da possível ligeira compactação do solo pela gradagem na dinâmica da água no solo já foram objeto de estudos de outros autores. BACCHI (1976), estudando o efeito do revolvimento do solo a grandes profundidades, concluiu que embora o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar fosse maior nestas condições, a produção resultante foi menor, provavelmente devido ao menor armazenamento de água verificado na camada de 15 a 45 cm.

SINGH *et alii* (1980) conseguiram bons resultados compactando o solo na cultura do arroz, diminuindo sensivelmente as perdas de água por percolação e também as necessidades de água para a cultura.

Nas condições deste experimento, também observou-se que a ligeira compactação resultante da gradagem, após a subsolagem, melhorou o armazenamento de água, nas várias camadas do perfil, conservando a umidade por um período mais longo.

- TESTEMUNHA
- SUBSOLAGEM
- △ GRADAGEM MÉDIA
- GRADAGEM PESADA

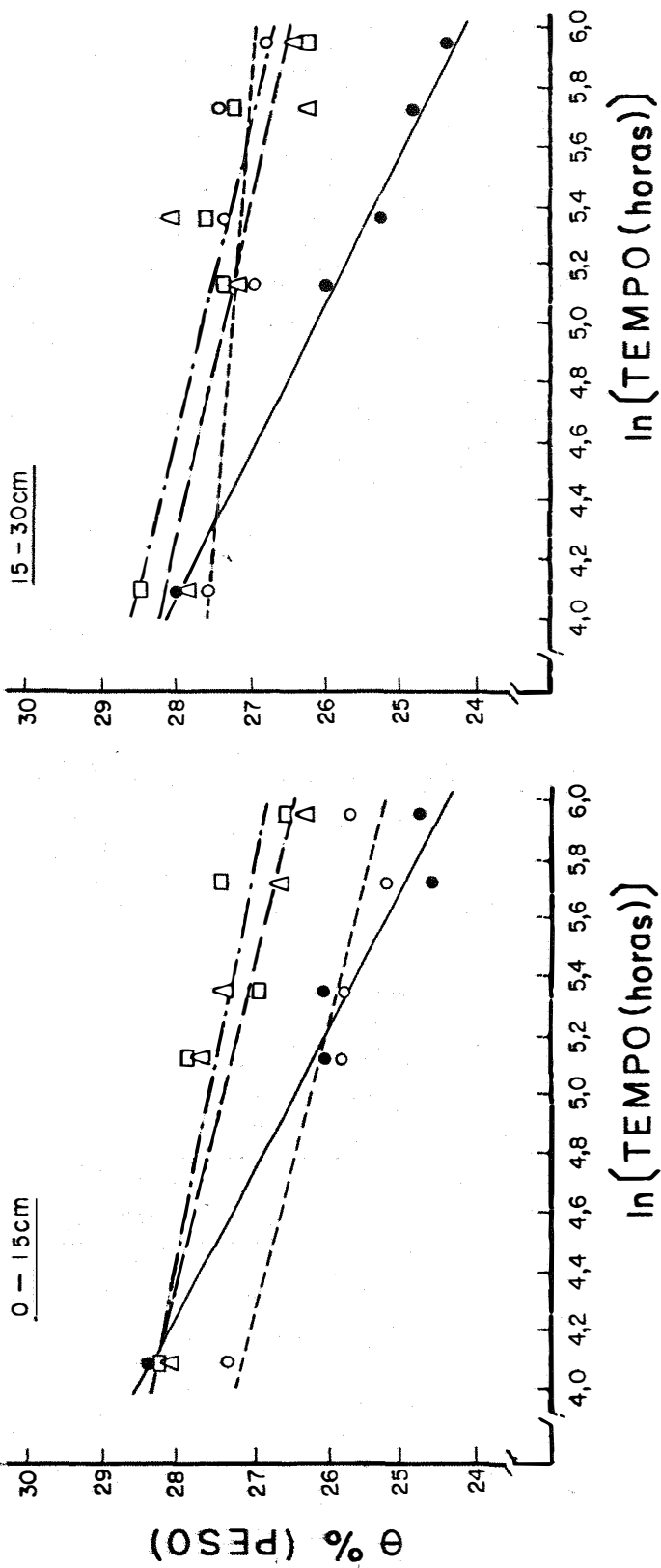


FIGURA 10 - Umidade % em massa (θ %) versus logaritmo natural do tempo, após a saturação (em horas), nas camadas 0-15 e 15-30 cm.

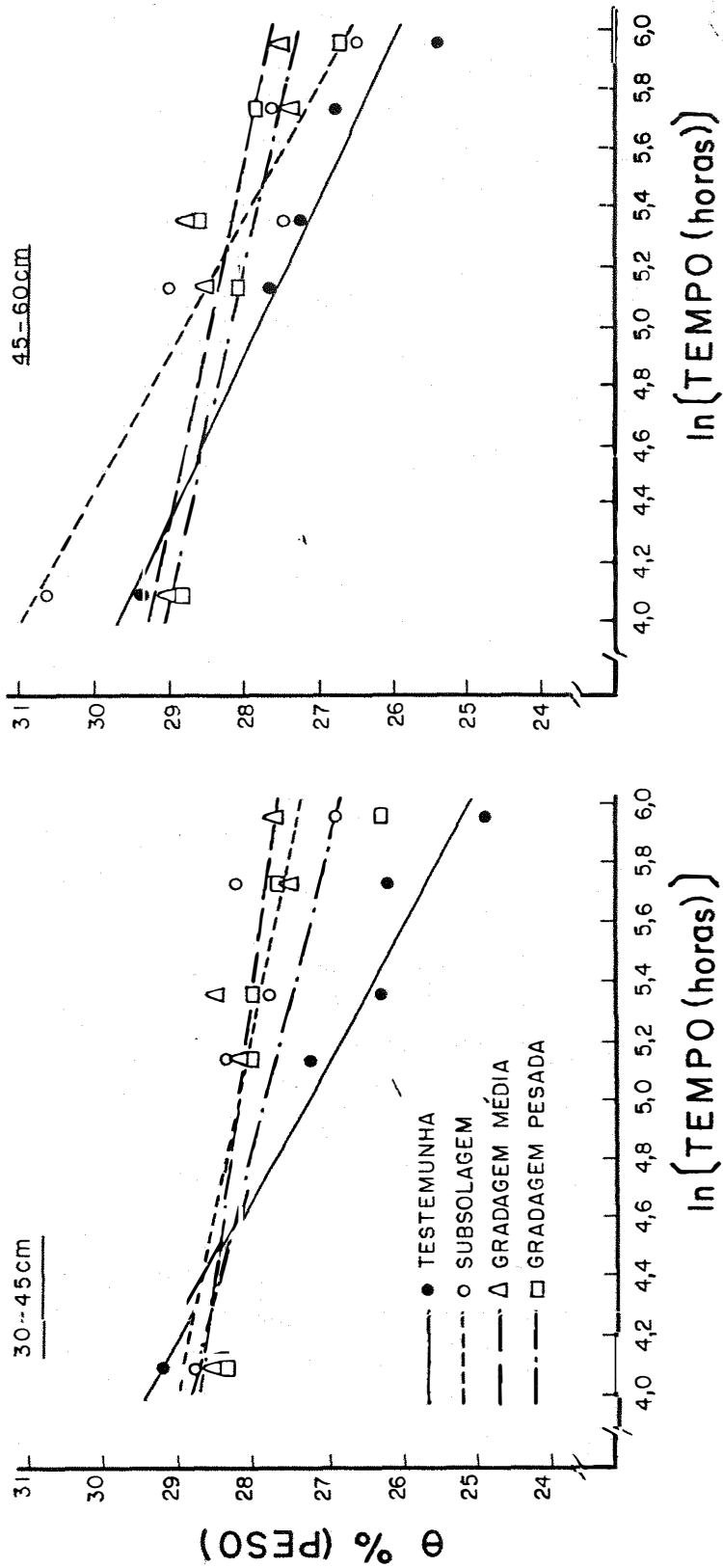


FIGURA 11 - Umidade % em massa (θ %) versus logaritmo natural do tempo, após a saturação (em horas), nas camadas 30-45 e 45-60 cm.

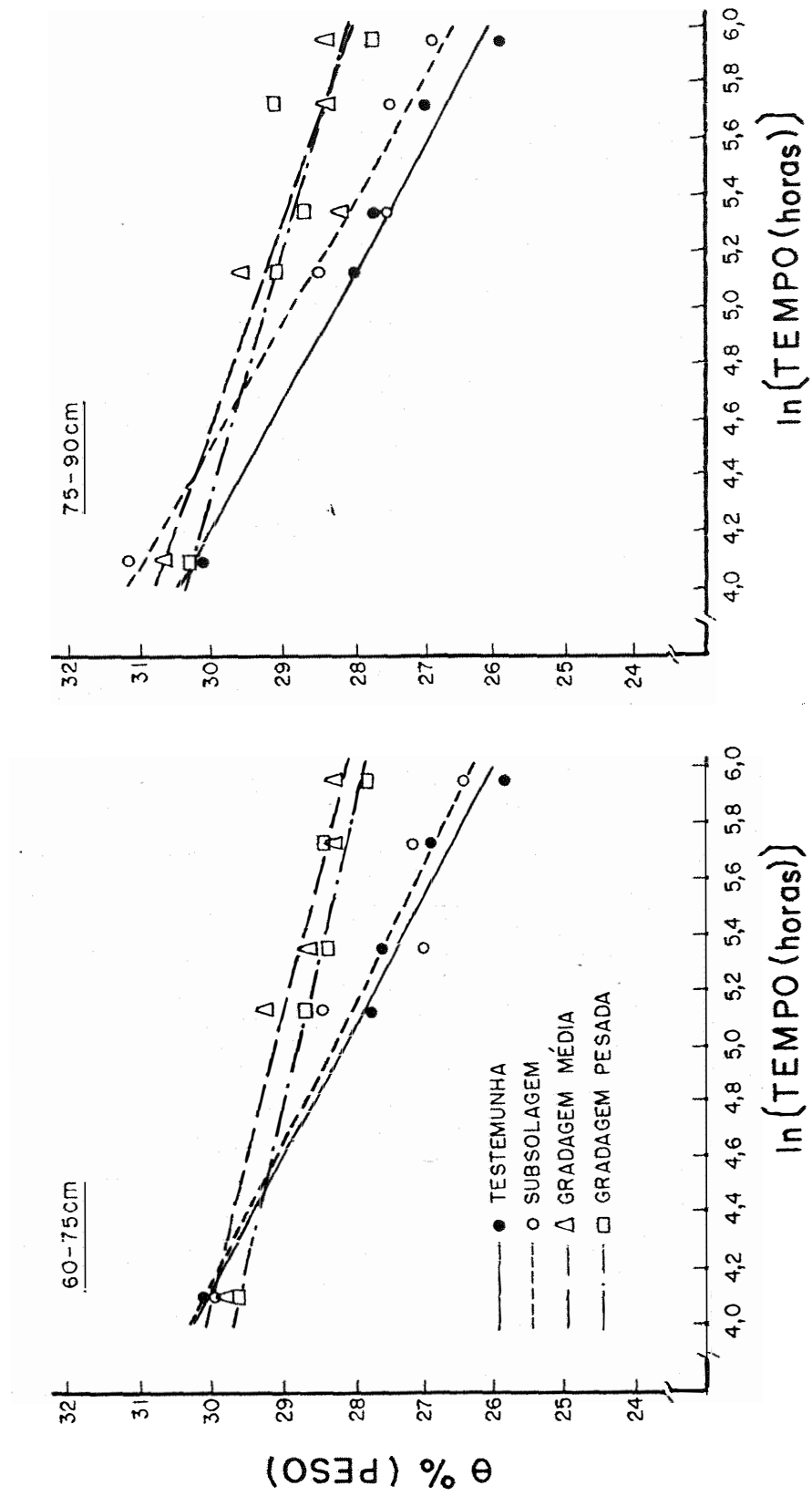


FIGURA 12 - Umidade % em massa (θ %) versus logaritmo natural do tempo, após a saturação (em horas), nas camadas 60-75 e 75-90 cm.

TABELA 8 - Equações da condutividade hidráulica do solo em função de sua umidade, para as diversas profundidades, obtidas através do método de LIBARDI *et alii* (1980).

Prof. (cm)	Condutividade Hidráulica (cm/min)				
	Testemunha	Subsolagem	Gradagem Média	Gradagem Pesada	
0 - 15	K=0,31 e ^{47,1(θ-0,37)}	K=0,16 e ^{93,5(θ-0,32)}	K=0,15 e ^{100,6(θ-0,32)}	K=0,12 e ^{127,4(θ-0,32)}	
15 - 30	K=0,60 e ^{50,6(θ-0,36)}	K=0,20 e ^{348,4(θ-0,29)}	K=0,27 e ^{119,0(θ-0,31)}	K=0,26 e ^{106,7(θ-0,32)}	
30 - 45	K=0,93 e ^{44,9(θ-0,38)}	K=0,31 e ^{126,3(θ-0,32)}	K=0,34 e ^{209,6(θ-0,30)}	K=0,41 e ^{106,7(θ-0,32)}	
45 - 60	K=1,24 e ^{50,7(θ-0,38)}	K=0,72 e ^{44,8(θ-0,40)}	K=0,45 e ^{57,5(θ-0,33)}	K=0,53 e ^{111,5(θ-0,33)}	
60 - 75	K=1,53 e ^{50,0(θ-0,39)}	K=0,93 e ^{50,4(θ-0,38)}	K=0,61 e ^{100,9(θ-0,34)}	K=0,66 e ^{112,2(θ-0,33)}	
75 - 90	K=1,85 e ^{45,8(θ-0,39)}	K=1,23 e ^{44,1(θ-0,40)}	K=0,80 e ^{72,7(θ-0,36)}	K=0,82 e ^{88,6(θ-0,35)}	

TABELA 9 - Valores de $\bar{\gamma}$ para as camadas 0-45 e 0-90 cm, nos diversos tratamentos.

Prof.	Testemunha	Subsolagem	Gradagem Média	Gradagem Pesada
0-45 cm	47,48	144,93	129,87	109,65
0-90 cm	47,60	90,66	110,25	107,67

5. CONCLUSÕES

A prática da subsolagem, seguida ou não de gradagens com grades de peso médio ou pesado, influi na velocidade de infiltração e na retenção da água no perfil do solo da seguinte maneira:

(a) Em termos médios, a velocidade de infiltração da água no perfil do solo foi maior no tratamento subsolagem + gradagem média.

(b) Tanto a subsolagem simples como a subsolagem + gradagens com grades de peso médio ou pesado, favoreceram a maior retenção de água em comparação com o tratamento testemunha, sobretudo quando a amostragem para fins de determinação da umidade foi efetuada a partir de 167 horas após a saturação do solo.

(c) Para o tempo de 305 horas após a saturação do solo, o teor de água nas várias profundidades foi maior nos tratamentos em que ocorreu a subsolagem seguida das gradagens média e pesada.

(d) O método de LIBARDI *et alii* (1980), empregado neste trau

balho, mostrou-se adequado na determinação da função $K(\theta)$, face os altos coeficientes de determinação obtidos nas regressões de umidade versus logarítmo do tempo de drenagem.

(e) De uma maneira geral, os tratamentos com implemento agrícola influíram na função $K(\theta)$ no sentido de que para uma mesma variação de umidade, as variações de condutividade do solo sob estes tratamentos foram bem maiores do que para o tratamento testemunha.

6. LITERATURA CITADA

- BACCHI, O.O.S., 1976. Efeitos da compactação sobre o sistema solo-planta em cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). Piracicaba, ESALQ/USP, 67 p. (Dissertação de Mestrado).
- BAVER, L.D.; W.H. GARDNER e W.R. GARDNER, 1972. *Soil physics*. John Wiley, New York. 492 p.
- BOURGET, S.J.; J.G. KEMP e B.K. DOW, 1961. Effect of tractor traffic on crop yields and soil density. *Agricultural Engineering*. St. Joseph, 42: 554-556.
- BRUNINI, O., 1975. Relações solo-água-planta em cultura de arroz em condições de sequeiro. Piracicaba, ESALQ/USP, 128 p. (Dissertação de Mestrado).
- BUCKINGHAM, E., 1907. Studies on the movement of soil moisture. U.S. Department of Agriculture Soils Bulletin 38. 61 p.

- COOPER, A.W., 1971. Effects of tillage on soil compaction. *In*: BARNES, K.K.; W.M. CARLETON; H.M. TAYLOR; R.I. THROCKMORTON; G.E. VANDEN BERG, Coord. *Compaction of agricultural soils*. ASAE Monograph. p. 315-364.
- COTE, D. e G. DUPUIS, 1980. Effects du sous-solage et du labour profond sur les propriétés du sol et le rendement de la luzerne et du maïs sur loam sableux Chaloupe. *Canadian Journal of Soil Science*. Ottawa, 60: 345-353.
- DARCY, H., 1856. *Les fontaines publique de la Ville de Dijon*. p. 592. Victor Dalmont, Paris.
- EHLERS, W., 1975. Observation on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Science*. Baltimore, 119: 242-249.
- FERNANDES, J., 1982. Mecanização do solo. Planalsucar, MIC, IAA, DAP. Piracicaba. 101 p.
- FUJIHARA INDUSTRY COMPANY, 1966. *Standard soil color chart*. Edição revisada. Fujihara Industry Company, Tóquio. 13 p.
- GERMANN, P. e K. BEVEN, 1981. Water flow in soil macropores. I- An experimental approach. *Journal of Soil Science*. Oxford, 32(1): 1-13.
- GILL, W.R., 1972. Economic assessment of soil compaction. *In*: BARNES, K.K.; W.M. CARLETON; H.M. TAYLOR; R.I. THROCKMORTON; G.E. VANDEN BERG, Coord. *Compaction of agricultural soils*. Michigan. p. 431-458.
- GROHMANN, F. e J.P. QUEIROZ NETO, 1966. Efeito da compactação artificial

- de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz. *Bragantia*. Campinas, 25(38): 421-431.
- JORGE, J.A., 1983a. *Solo: manejo e adubação*. Livraria Nobel S.A. - Editora e Distribuidora. 2a. edição (revista e ampliada). São Paulo. 315 p.
- JORGE, J.A., 1983b. Compactação do solo: causas, consequências e maneiras de evitar sua ocorrência. Circular nº 117. Instituto Agrônomo, Campinas. 22 p.
- JOSÉ, C., 1978. Análise dos efeitos da compactação na difusividade da água no solo. Piracicaba, ESALQ/USP. 87 p. (Dissertação de Mestrado).
- LIBARDI, P.L., 1978. Condutividade hidráulica do solo em condições de campo. Piracicaba, ESALQ/USP. 113 p. (Tese de Doutorado).
- LIBARDI, P.L.; K. REICHARDT e V.F. NASCIMENTO Fº, 1979. Análise de redistribuição da água visando a condutividade hidráulica do solo. *Energia Nuclear e Agricultura*. Piracicaba, 1(2): 108-122.
- LIBARDI, P.L.; K. REICHARDT; D.R. NIELSEN e J.W. BIGGAR, 1980. Simple field methods for estimating the unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of American Proceeding Journal*, Madison, 44: 3-7.
- LINDSTROM, M.J. e W.B. VOORHEES, 1980. Planting wheel traffic effects on interrow runoff and infiltration. *Soil Science Society of American Journal*. Madison, 44: 84-88.
- MEREDITH, H.L. e W.H. PATRICK, 1961. Effects of soil compaction on subsoils

- root penetration and physical properties of three soils in Louisiana. *Agronomy Journal*. Madison, 53: 163-167.
- MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL, 1972. Carta do Brasil ao milionésimo. *Ministério do Planejamento e Coordenação Geral - Fundação IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia*. Brasília, DF, 1a. edição. Carta Paranapanema SS-22. 1 p.
- MORGAN, W.C.; J. LETEY; S.J. RICHARDS e N. VALORAS, 1966. Physical soil amendments, soil compaction, irrigation and wetting agents in turfgrass management. I - Effects on compactibility, water infiltration rates, evapotranspiration and number of irrigations. *Agronomy Journal*, Madison, 58: 525-535.
- NIELSEN, D.R.; J.W. BIGGAR e K.T. ERH, 1973. Spatial variability of field-measures soil-water properties. *Hilgardia*. Berkeley, 42(7): 215-260.
- REICHARDT, K., 1971. Water infiltration into uniform and layered soils. University of California. 74 p. (Tese de Ph.D.).
- REICHARDT, K.; F. GROHMANN; P.L. LIBARDI e S.V. QUEIROZ, 1976. Spatial variability of physical properties of a tropical soil: II - Soil water retention curves and hydraulic conductivity. CENA, BT-005. Piracicaba. 24 p.
- RICHARDS, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics*. New York, 1: 318-333.
- SINGH, N.T.; M.S. PATEL; R. SINGH e A.C. VIG, 1980. Effect of soil compaction

on yield and water use efficiency of rice in a highly permeable soil. *Agronomy Journal*. Madison, 72: 499-502.

SWARTZENDRUBER, D., 1966. Soil-water behavior as described by transport coefficients and functions. *Advances in Agronomy*. New York, 18: 327-362.

THORNTHWAITE, C.W. e J.R. MATHER, 1955. *The water balance*. *Publications in Climatology III(1)*. Centerton, New Jersey. 104 p.

TROUSE, JR., A.C., 1965. Effects of soil compression on the development of sugar-cane roots. *Proceedings of the Twelfth Congress of the International Society of Sugar-Cane Technologists*. Puerto Rico. p. 137-152.

USDA, 1955. *The Yearbook of Agriculture: Water*. The United States Government Printing Office. Washington. 751 p.

WARKENTIN, B.P., 1971. Effects of compaction on content and water transmission of water in soils. In: BARNES, K.K.; W.M. CARLETON; H.M. TAYLOR; R.I. THROCKMORTON; G.E. VANDEN BERG, Coord. *Compaction of agricultural soils*. ASAE Monograph. Michigan. p. 126-153.

WEAVER, H.A., 1950. Tractor use effects on volume weight of Davidson loam. *Agricultural Engineering*. St. Joseph, 31: 181-183.

A P E N D I C E

TABELA 10 - Umidade do solo (% em peso) na camada de 0-15 cm, em vários tempos, nos quatro tratamentos, com oito repetições.

Tratamentos	Tempo (horas) e Umidade									
	$t_1 = 60$		$t_2 = 167$		$t_3 = 215$		$t_4 = 305$		$t_5 = 376$	
Testemunha	25,9	29,0	25,8	25,1	24,1	27,9	23,9	25,0	23,9	24,6
	31,6	27,6	27,0	25,0	24,2	28,2	24,2	24,8	24,4	24,6
	24,0	30,6	24,8	27,9	25,6	25,2	23,2	25,4	23,8	25,6
	29,8	28,4	25,2	27,2	25,9	27,2	23,9	26,5	24,1	26,8
Subsolagem	27,2	25,9	26,9	25,5	26,7	26,3	25,0	23,2	26,3	24,7
	27,6	27,1	27,4	24,6	25,8	26,2	25,2	23,5	26,4	24,6
	27,4	27,9	25,0	25,9	26,5	24,0	25,2	26,0	25,4	25,9
	27,4	29,0	25,2	25,8	27,3	24,0	27,4	26,0	25,5	26,8
Sub + GM	28,5	28,2	25,9	27,1	23,5	27,1	27,1	26,0	26,3	26,0
	29,0	28,3	26,9	27,0	26,9	27,0	26,9	25,7	26,4	25,7
	27,1	28,8	26,7	29,4	26,7	29,4	27,5	26,6	27,1	25,8
	26,5	28,4	27,1	30,4	27,1	30,4	26,2	27,0	26,9	25,7
Sub + GP	28,2	30,4	29,6	26,5	29,3	27,1	27,3	26,9	26,3	25,3
	28,0	29,7	29,7	26,8	23,0	26,7	27,8	27,1	24,4	24,4
	28,0	26,6	30,0	26,4	28,1	25,6	28,8	26,6	28,0	28,0
	28,0	26,8	28,2	25,1	28,4	26,7	28,7	26,3	27,4	27,4

TABELA 11 - Umidade do solo (% em peso) na camada de 15-30 cm, em vários tempos, nos quatro tratamentos, com oito repetições.

Tratamentos	Tempo (horas) e Umidade									
	t ₁ = 60		t ₂ = 167		t ₃ = 215		t ₄ = 305		t ₅ = 376	
Testemunha	26,5	27,5	25,0	25,8	25,1	25,8	24,1	25,1	24,2	24,1
	26,7	27,7	25,0	25,3	24,8	26,3	24,4	26,1	24,2	23,9
	27,3	28,0	26,1	28,6	25,2	24,8	24,2	25,0	23,7	26,0
	31,1	28,0	25,6	26,6	24,8	24,7	24,1	25,6	23,6	25,9
Subsolagem	28,2	28,1	27,4	26,4	26,7	28,2	26,1	28,0	26,6	26,6
	26,6	28,0	27,7	25,7	26,3	28,4	25,9	27,5	26,3	26,4
	27,4	28,6	26,0	29,0	27,4	26,9	27,1	29,3	25,2	29,1
	27,4	26,8	25,5	28,6	27,4	26,7	27,3	28,7	25,2	29,1
Sub + GM	29,9	26,8	26,0	26,3	26,8	27,9	24,6	26,2	24,6	26,8
	30,1	27,5	26,2	26,8	30,3	27,2	28,8	26,1	27,5	26,9
	26,6	27,3	27,6	29,4	28,6	29,4	25,4	26,6	26,3	26,0
	27,4	27,6	26,6	28,6	28,5	29,7	25,3	26,4	26,7	26,4
Sub + GP	28,7	29,3	28,8	26,9	28,5	26,6	27,6	26,6	24,6	24,6
	27,5	29,3	28,1	26,8	29,0	26,7	27,6	25,9	25,2	25,2
	29,1	28,3	28,0	26,8	28,8	26,7	28,9	27,1	28,2	28,2
	27,1	28,4	27,3	26,8	28,8	26,4	29,6	25,8	27,6	27,6

TABELA 12 - Umidade do solo (% em peso) na camada de 30-45 cm, em vários tempos, nos quatro tratamentos, com oito repetições.

Tratamentos	Tempo (horas) e Umidade									
	$t_1 = 60$		$t_2 = 167$		$t_3 = 215$		$t_4 = 305$		$t_5 = 376$	
Testemunha	27,4	29,5	25,8	27,1	25,5	25,9	25,4	26,2	25,1	23,5
	28,7	29,3	26,3	27,3	26,0	26,5	25,3	26,6	25,0	25,0
	29,1	29,8	27,2	27,0	27,7	25,6	25,6	26,6	24,2	25,8
	30,1	29,7	28,7	27,2	26,6	25,5	25,5	27,6	24,2	25,8
Subsolagem	29,4	25,4	28,0	29,3	25,4	30,1	25,6	29,4	24,2	26,3
	29,6	30,0	29,0	28,2	25,2	30,8	25,8	29,1	25,1	27,6
	29,5	28,6	27,3	28,0	28,3	27,4	27,3	29,6	26,0	29,2
	29,5	28,0	27,1	28,0	27,0	27,7	27,8	28,9	26,9	29,2
Sub + GM	28,4	28,0	27,4	28,3	27,4	28,1	29,1	26,9	28,1	27,4
	29,7	28,2	27,8	27,9	28,9	28,5	29,3	26,2	28,0	27,4
	27,7	27,0	28,2	28,5	28,6	28,5	26,7	27,4	27,8	27,8
	28,4	27,4	27,8	28,9	28,8	28,4	26,9	26,8	27,6	26,7
Sub + GP	27,4	28,6	27,9	27,6	28,8	24,0	29,0	26,4	25,5	25,5
	27,5	29,3	28,2	27,7	30,0	27,9	28,2	26,5	24,8	27,2
	27,3	29,6	27,7	27,4	28,6	26,5	28,2	27,7	26,4	26,4
	27,7	29,6	28,0	27,2	28,6	27,5	28,0	26,1	27,3	26,2

TABELA 13 - Umidade do solo (% em peso) na camada de 45-60 cm, em vários tempos, nos quatro tratamentos, com oito repetições.

Tratamentos	Tempo (horas) e Umidade									
	$t_1 = 60$		$t_2 = 167$		$t_3 = 215$		$t_4 = 305$		$t_5 = 376$	
Testemunha	28,9	29,6	27,2	27,9	26,6	27,9	26,9	26,8	25,5	26,1
	30,4	30,5	27,3	27,6	26,4	28,2	27,1	26,7	25,4	26,2
	28,4	28,6	28,2	27,3	27,2	27,3	26,1	27,1	24,2	26,0
	29,5	29,7	28,0	27,1	27,0	27,1	25,8	27,5	24,1	26,1
Subsolagem	32,3	29,6	29,3	29,9	24,8	29,5	26,0	28,6	23,8	28,2
	31,8	28,6	29,6	30,0	24,8	29,1	25,8	28,6	23,5	28,0
	32,1	30,4	26,9	30,1	27,6	28,8	27,3	29,0	25,9	28,0
	32,1	28,6	26,7	29,6	27,3	28,4	27,3	28,3	26,0	28,1
Sub + GM	30,1	29,4	28,4	27,6	28,7	28,6	29,0	26,7	28,6	27,3
	30,0	29,8	28,9	27,8	28,4	28,4	29,3	26,4	28,8	26,8
	28,5	29,0	29,5	28,3	29,2	29,1	26,0	27,0	26,4	27,8
	28,3	26,5	28,9	28,6	29,2	29,1	27,5	28,2	27,1	27,2
Sub + GP	28,7	28,8	29,0	27,2	29,0	29,0	29,5	27,1	25,8	25,8
	28,1	28,3	28,5	28,1	28,5	28,3	26,3	27,6	26,2	26,2
	29,0	29,6	28,1	27,9	28,9	28,2	28,2	28,0	27,2	27,2
	29,0	29,1	28,4	27,9	28,9	28,0	28,2	27,8	27,6	27,6

TABELA 14 - Umidade do solo (% em peso) na camada de 60-75 cm, em vários tempos, nos quatro tratamentos, com oito repetições.

Tratamentos	Tempo (horas) e Umidade									
	$t_1 = 60$		$t_2 = 167$		$t_3 = 215$		$t_4 = 305$		$t_5 = 376$	
Testemunha	31,2	30,7	27,3	28,0	27,0	27,6	26,8	27,4	25,9	26,2
	29,5	30,3	27,4	28,2	27,0	28,1	26,6	27,1	25,8	26,2
	29,8	30,0	28,4	27,9	27,4	28,4	25,8	27,5	25,0	26,4
	29,5	30,0	27,7	27,2	27,1	28,0	25,8	27,8	25,1	26,0
Subsolagem	30,3	26,2	29,0	29,1	24,6	29,1	26,5	28,1	24,1	27,0
	30,7	30,0	29,0	28,9	24,4	28,8	26,5	28,1	23,9	27,1
	30,5	32,4	26,6	29,8	26,4	28,7	25,0	28,0	25,6	28,8
	30,5	30,2	26,0	29,6	25,7	28,4	28,2	27,7	26,5	28,2
Sub + GM	29,6	30,4	29,3	29,2	30,0	29,4	29,5	27,8	29,0	27,8
	30,2	30,0	29,3	29,3	29,1	28,8	29,0	27,9	29,4	28,4
	29,4	30,0	29,0	28,9	29,2	28,2	27,3	28,1	27,3	28,4
	29,5	30,6	29,4	29,4	27,3	27,0	28,0	28,8	28,2	27,9
Sub + GP	29,4	29,0	28,8	29,3	28,3	28,3	29,9	27,5	27,1	27,1
	29,4	29,7	29,3	28,7	28,5	28,8	30,1	27,5	27,2	27,2
	30,0	30,0	28,6	28,2	29,1	28,2	28,3	28,2	28,7	28,7
	30,2	29,4	29,0	27,9	28,3	28,4	28,2	28,1	28,2	28,2

TABELA 15 - Umidade do solo (% em peso), na camada de 75-90 cm, em vários tempos, nos quatro tratamentos, com oito repetições.

Tratamentos	Tempo (horas) e Umidade									
	$t_1 = 60$		$t_2 = 167$		$t_3 = 215$		$t_4 = 305$		$t_5 = 376$	
Testemunha	30,0	30,5	27,6	28,3	27,6	26,0	26,8	27,4	25,7	26,4
	28,8	29,3	27,9	28,6	27,5	27,8	26,8	27,3	25,6	26,4
	30,6	31,4	28,0	28,0	27,5	28,6	26,4	27,8	25,0	26,4
	30,1	30,7	28,0	28,0	27,3	29,0	26,3	27,4	25,6	26,3
Subsolagem	30,4	30,2	28,9	29,7	26,0	29,5	27,4	28,6	25,0	27,5
	31,6	30,2	29,2	29,5	26,2	29,5	27,0	28,6	25,3	27,4
	31,0	32,2	25,0	30,4	26,8	28,7	26,1	27,9	27,1	27,8
	31,0	32,2	24,9	30,0	26,4	28,7	25,5	28,8	26,6	28,7
Sub + GM	30,9	32,0	29,7	29,6	29,1	29,1	29,1	27,7	29,5	28,4
	30,4	32,0	29,7	29,4	29,2	28,5	29,2	28,5	29,0	28,6
	29,7	31,2	29,8	28,8	27,9	27,0	27,4	29,1	27,8	28,4
	29,1	30,6	29,7	29,9	27,5	27,1	27,4	29,1	27,5	28,4
Sub + GP	30,3	30,0	30,6	29,2	28,6	29,3	29,5	27,7	27,1	27,1
	30,2	29,9	29,8	28,9	28,6	28,7	30,4	28,3	27,7	27,7
	31,4	29,8	29,1	28,2	28,7	28,7	30,5	28,5	28,0	28,0
	30,8	29,7	28,8	27,9	28,7	28,5	30,1	28,2	28,2	28,2

TABELA 16 - Regressões de $\theta_0 - \theta$ versus $\ln t$ para as camadas 0-15, 15-30, 30-45, 45-60, 60-75 e 75-90 cm.

Profundidade	Tratamentos	Regressões	R ²
0 - 15 cm	Testemunha	$\theta_0 - \theta = 0,280 + 2,123 \ln t$	0,96
	Subsolagem	$\theta_0 - \theta = 0,112 + 1,069 \ln t$	0,85
	Grad. Média	$\theta_0 - \theta = 4,198 + 0,994 \ln t$	0,87
	Grad. Pesada	$\theta_0 - \theta = 0,151 + 0,802 \ln t$	0,72
15 - 30 cm	Testemunha	$\theta_0 - \theta = 0,185 + 1,978 \ln t$	0,99
	Subsolagem	$\theta_0 - \theta = 0,044 + 0,287 \ln t$	0,39
	Grad. Média	$\theta_0 - \theta = 0,008 + 0,840 \ln t$	0,53
	Grad. Pesada	$\theta_0 - \theta = 0,097 + 0,937 \ln t$	0,81
30 - 45 cm	Testemunha	$\theta_0 - \theta = 0,049 + 2,226 \ln t$	0,96
	Subsolagem	$\theta_0 - \theta = 0,173 + 0,792 \ln t$	0,81
	Grad. Média	$\theta_0 - \theta = 0,094 + 0,477 \ln t$	0,55
	Grad. Pesada	$\theta_0 - \theta = 0,035 + 0,937 \ln t$	0,70
45 - 60 cm	Testemunha	$\theta_0 - \theta = 0,017 + 1,971 \ln t$	0,95
	Subsolagem	$\theta_0 - \theta = 0,116 + 2,230 \ln t$	0,93
	Grad. Média	$\theta_0 - \theta = 2,154 + 1,738 \ln t$	0,68
	Grad. Pesada	$\theta_0 - \theta = 0,057 + 0,897 \ln t$	0,60
60 - 75 cm	Testemunha	$\theta_0 - \theta = 0,254 + 2,174 \ln t$	0,97
	Subsolagem	$\theta_0 - \theta = 0,190 + 1,984 \ln t$	0,93
	Grad. Média	$\theta_0 - \theta = 0,108 + 0,991 \ln t$	0,96
	Grad. Pesada	$\theta_0 - \theta = 0,046 + 0,891 \ln t$	0,95
75 - 90 cm	Testemunha	$\theta_0 - \theta = 0,116 + 2,180 \ln t$	0,97
	Subsolagem	$\theta_0 - \theta = 0,060 + 2,268 \ln t$	0,98
	Grad. Média	$\theta_0 - \theta = 0,009 + 1,376 \ln t$	0,85
	Grad. Pesada	$\theta_0 - \theta = 0,113 + 1,129 \ln t$	0,81

TABELA 17 - Regressões de $\bar{\theta}_o - \bar{\theta}$ versus $\ln t$ para as camadas 0-15, 0-30, 0-45, 0-60, 0-75 e 0-90 cm.

Camada	Tratamentos	Regressões	R^2
0 - 15 cm	Testemunha	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,280 + 2,123 \ln t$	0,96
	Subsolagem	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,112 + 1,069 \ln t$	0,85
	Grad. Média	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 4,198 + 0,994 \ln t$	0,87
	Grad. Pesada	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,151 + 0,802 \ln t$	0,72
0 - 30 cm	Testemunha	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,274 + 2,050 \ln t$	0,99
	Subsolagem	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,073 + 0,678 \ln t$	0,89
	Grad. Média	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,066 + 0,919 \ln t$	0,76
	Grad. Pesada	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,027 + 0,869 \ln t$	0,83
0 - 45 cm	Testemunha	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,152 + 2,106 \ln t$	0,99
	Subsolagem	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,207 + 0,690 \ln t$	0,89
	Grad. Média	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,051 + 0,770 \ln t$	0,68
	Grad. Pesada	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,157 + 0,912 \ln t$	0,80
0 - 60 cm	Testemunha	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,134 + 2,077 \ln t$	0,99
	Subsolagem	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,080 + 1,122 \ln t$	0,95
	Grad. Média	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,110 + 0,787 \ln t$	0,70
	Grad. Pesada	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,005 + 0,891 \ln t$	0,77
0 - 75 cm	Testemunha	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,153 + 2,094 \ln t$	0,99
	Subsolagem	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,008 + 1,272 \ln t$	0,96
	Grad. Média	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,093 + 0,825 \ln t$	0,80
	Grad. Pesada	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,006 + 0,892 \ln t$	0,81
0 - 90 cm	Testemunha	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,1022 + 2,101 \ln t$	0,99
	Subsolagem	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,2007 + 1,403 \ln t$	0,96
	Grad. Média	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,026 + 0,907 \ln t$	0,90
	Grad. Pesada	$\bar{\theta}_o - \bar{\theta} = 0,021 + 0,927 \ln t$	0,82