

**BALANÇO HÍDRICO EM CULTURAS DE FEIJÃO**  
*(Phaseolus vulgaris L.)* E DE MILHO (*Zea mays L.*)  
**SOB CONDIÇÕES DE CAMPO**

**ANTONIO CARLOS SARAIVA DA COSTA**  
Engenheiro Agrônomo

**Orientador: PAULO LEONEL LIBARDI**

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.

**PIRACICABA**  
Estado de São Paulo - Brasil  
Setembro - 1986

À minha esposa

*Norma Zancarli de Melo Costa,*

ofereço este trabalho

Aos meus pais

*Arcelina e Antonio,*

D E D I C O

AGRADECIMENTOS

- Ao Dr. *Paulo Leonel Libardi*, pela orientação e amizade em cada momento.
- Aos colegas *Daciano Stênico*, *José Ademir Rodrigues*, *Paula Pinheiro Padovese*, *Paulo José Hamakawa*, *Segundo Urquiaga Caballero*, pela ajuda na amostragem, determinações de campo e laboratório e discussões ao longo do trabalho.
- *João Eduardo Pilotto*, pela datilografia e montagem final deste trabalho.
- Aos Professores *Klaus Reichardt*, *Sergio Oliveira Moraes*, pelo longo tempo de convívio e pelas instruções adquiridas.
- Às Instituições:  
*Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)*,  
*Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP)*,  
*Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"*,  
pelas facilidades oferecidas.
- E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meu muito obrigado.

Creative study, however,  
finds its largest application  
in those subjects in which,  
while much is known, more  
remains to be known.

*Thomas C. Chamberlin*

SUMÁRIO

|   | <u>Página</u> |
|---|---------------|
| 1. INTRODUÇÃO .....   | 1             |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA .....                                  | 3             |
| 2.1. Balanço hídrico .....                                      | 3             |
| 2.2. Características fisiológicas e hídricas do feijoeiro ..... | 10            |
| 2.3. Características fisiológicas e hídricas do milho ..        | 15            |
| 2.4. Drenagem profunda .....                                    | 19            |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS .....                                     | 30            |
| 3.1. Descrição da área .....                                    | 30            |
| 3.2. O solo .....   | 30            |
| 3.2.1. Caracterização física .....                              | 31            |
| 3.2.2. Caracterização química .....                             | 33            |
| 3.3. Parcela experimental .....                                 | 34            |
| 3.4. Equipamento utilizado .....                                | 36            |
| 3.4.1. Na parcela experimental .....                            | 36            |
| 3.4.2. Equipamentos do Posto Agrometeorológico ...              | 41            |
| 3.4.3. Equipamentos de laboratório .....                        | 42            |
| 3.5. Culturas .....   | 42            |
| 3.5.1. Feijão .....   | 43            |
| 3.5.2. Milho .....  | 44            |
| 3.6. Amostragem e determinação na parcela experimental .        | 45            |
| 3.6.1. Amostragem de plantas .....                              | 45            |
| 3.6.2. Determinação de umidade do solo .....                    | 45            |
| 3.7. Parâmetros avaliados .....                                 | 46            |
| 3.8. Metodologia .....  | 47            |
| 3.8.1. Componentes do balanço hídrico .....                     | 47            |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                 | 54            |
| 4.1. Curva de retenção de água do solo .....                    | 54            |
| 4.2. Condutividade hidráulica em solo não saturado ....         | 67            |
| 4.2.1. Redistribuição da água no solo .....                     | 67            |
| 4.2.2. Condutividade hidráulica do solo .....                   | 75            |

|   | <u>Página</u> |
|---|---------------|
| 4.2.3. Capacidade de campo da Terra Roxa Estruturada .....    | 82            |
| 4.3. Balanço hídrico das culturas de feijão e milho ..        | 84            |
| 4.3.1. Cultura de feijão .....                                | 85            |
| 4.3.2. Cultura de milho .....                                 | 86            |
| 4.3.3. Evapotranspiração das culturas de feijão e milho ..... | 94            |
| 4.3.4. Drenagem profunda .....                                | 122           |
| 4.3.5. Eficiência de utilização de água .....                 | 130           |
| 5. CONCLUSÕES .....   | 136           |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                           | 140           |

## RESUMO

COSTA, A.C.S. da, Mestrado, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, setembro de 1986. Balanço hídrico em culturas de feijão (Phaseolus vulgaris L.) e de milho (Zea mays L.) sob condições de campo. Professor Orientador: P.L. Libardi.

Numa Terra Roxa Estruturada (Paleudalf Óxico) do município de Piraicaba (SP), foram estimados os diversos componentes da equação do balanço hídrico para uma cultura de feijão (Phaseolus vulgaris L.), cultivar carioca, e uma cultura de milho (Zea mays L.), cultivar Cargill-501. Foi efetuada uma caracterização física, química e hídrica pormenorizada da parcela experimental. Para a estimativa da drenagem profunda e armazenagem de água, foram utilizados tensiômetros instalados nas profundidades de 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 e 135 cm, e curvas de retenção de água ajustadas ( $r > 0,97$ ) a uma equação empírica, de VAN GENUCHTEN (1978). A condutividade hidráulica do solo foi determinada pelo método da umidade de LIBARDI et alii (1980). A evapotranspiração total da cultura de feijão foi de 305,36 mm (média de 3,55 mm/dia) e a da cultura de milho, de 816,92 mm (média de 6,28 mm/dia). A evapotranspiração estimada foi constante para as camadas maiores que 0-60 cm, para as duas culturas. As perdas de água por drenagem profunda foram de 6 e 3% da precipitação e da evapotranspiração, respectivamente, considerando-se a camada de 0 - 60

cm, tanto para a cultura de feijão como para a cultura de milho. A variação da drenagem profunda foi de, no mínimo, duas vezes o valor médio numa mesma profundidade. As produções de grãos (secos em estufa a 60°C até peso constante) foram de 1488 kg/ha e 8869 kg/ha, para as culturas de feijão e milho, respectivamente. A eficiência de utilização de água (EUA) foi de 0,49 kg/m<sup>3</sup> para a cultura de feijão e de 1,09 kg/m<sup>3</sup> para a de milho, dentro da ordem de valores encontrados na literatura. Foi feita também uma análise crítica do método do balanço hídrico para o cálculo da ET, mostrando os problemas, dificuldades e recomendações para o seu uso correto.



## SUMMARY

COSTA, A.C.S. da, M.Sc., Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, September 1986. Water balance in bean (Phaseolus vulgaris L.) and corn (Zea mays L.) crops under field conditions. Adviser: P.L. LIBARDI.

In an Oxic Paleudalf located in the county of Piracicaba (SP), Brazil, the water balance equation components were estimated for bean (Phaseolus vulgaris L.) and corn (Zea mays L.) crops. In the experimental plot, a detailed physical, chemical and hydrological characterization was carried out. In order to estimate the deep drainage and soil-water storage, tensiometers (at depths of 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 and 135 cm) and correspondent soil retention curves fitted to the empirical equation (VAN GENUCHTEN, 1978), were used. The hydraulic conductivity of the soil was determined by the  $\theta$ -method of LIBARDI et alii (1980). The mean evapotranspiration rate for the bean crop was 3.55 mm/day and for the corn one 6.28 mm/day. The calculated evapotranspiration became constant to soil depths bigger than 60 cm, in both crops. The deep drainage, at the layer of 0-60 cm was 6 and 3% of the precipitation and evapotranspiration, respectively for both crops and its variation was at least two times the mean value. The grain yields were 1,488 kg/ha and 8,869 kg/ha to bean and corn, respectively. The water use

efficiency was  $0.49 \text{ kg/m}^3$  for the bean crop and  $1.09 \text{ kg/m}^3$  for the corn one, being of the same order of magnitude of the literature values. A critical analysis of the water balance method to calculate evapotranspiration was also made, showing the difficulties and the recommendations for its appropriate use.

## 1. INTRODUÇÃO

A água é o principal constituinte de todos os seres vivos. Nos vegetais, chega a atingir 98% da sua massa total. Da atmosfera à superfície da crosta, infiltrando no solo, atingindo o lençol freático, preenchendo rios e lagos, alcançando seu reservatório final, o mar, a água sempre tende a pontos de mínima energia. Participa ativamente em processos metabólicos, tanto em vegetais como animais, sendo o meio natural onde ocorrem as reações bioquímicas. No ciclo hidrológico, os meteorologistas a estudam na formação de nuvens, tipos de chuvas, movimento de massas úmidas; os hidrologistas, na sua formação, distribuição e movimento subterrâneo; os limnologistas, a água dos rios, etc. Na Engenharia Agrônômica, vários são os setores que se dedicam ao estudo da água, desde a Fisiologia Vegetal, Solos, Irrigação, até a Economia Agrícola. Quando se elabora o ciclo hidrológico numa certa área delimitada com uma cultura agrícola, diz-se que se calcula o balanço hídrico de tal cultura.

Associada a condições climáticas e edáficas, a produção das culturas agrícolas é função da presença da água e nutrientes em época e quantidades apropriadas. Falta ou excesso é frequente fator de diminuição de produção. A elaboração do balanço hídrico das culturas fornece dados sobre as necessidades hídricas de uma determinada comunidade vegetal, bem como caracteriza climatolo-

gicamente determinado local para um vegetal qualquer. O balanço hídrico é a conjugação da lei de conservação das massas e a da lei de conservação da energia. O balanço de massa é constituído por fatores discretos e contínuos. Os fatores discretos, precipitação, irrigação e deflúvio superficial, são de fácil medida; os fatores contínuos, fluxo de água por drenagem profunda, ou ascensão capilar, evapotranspiração da cultura e armazenamento da água no perfil do solo, são complexos, necessitando cuidados em sua determinação. Estes fatores, além de necessários na elaboração do balanço hídrico, são, em separado, de importância na resolução de uma série de problemas, tais como, erosão do solo, contaminação de lençol freático por produtos químicos, problemas de fertilidade, produtividade do solo, etc.

Há, na literatura especializada, uma série de modelos matemáticos e físicos para o cálculo da condutividade hidráulica em solo não saturado e da curva de retenção de água, necessário ao cálculo da drenagem profunda e da variação de armazenamento da água do solo.

Este trabalho teve por objetivo avaliar (i) num experimento de balanço hídrico de duas culturas (uma de feijão e outra de milho) o comportamento da equação da curva de retenção da água no solo, descrita em VAN GENUCHTEN (1980), e (ii) o método da umidade de LIBARDI et alii (1980) para o cálculo da condutividade hidráulica da Terra Roxa Estruturada (Paleudalf óxico) do município de Piracicaba (SP).

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Balanço hídrico

O balanço hídrico é a somatória das quantidades de água que entram num determinado volume de solo vegetado (ou não), e das quantidades de água que dele saem, cujo resultado é a variação da quantidade de água armazenada no perfil de profundidade igual a do sistema radicular da cultura, no caso de solo vegetado.

O manejo apropriado da água para uma cultura baseia-se na compreensão dos processos (infiltração, distribuição, percolação, retenção, absorção de água pelas plantas) e fatores (espécie vegetal, espaçamento, características físicas do solo, adubação e outros) que interferem na dinâmica da água.

A equação do balanço hídrico é a aplicação do princípio de conservação da matéria (ROSENBERG, 1974; HILLEL, 1980; OMETTO, 1981). A quantidade de água que é formada ou decomposta no solo é insignificante em relação à adicionada (precipitação, irrigação, ascensão capilar), perdida (deflúvio superficial, drenagem profunda e evapotranspiração) ou a armazenada no perfil do solo.

O balanço hídrico está intimamente relacionado ao balanço de energia, pois seus processos envolvem o gasto de energia. Por muito tempo, a dinâmica nas interfaces solo-água, água-planta e água-atmosfera era estudada em separado, o que prejudicou avanços,

tanto no aspecto conceitual como prático, com definições, símbolos, etc. sendo diferentemente utilizados por pesquisadores das áreas de solos, fisiologia vegetal e agrometeorologia. O desenvolvimento teórico (aplicação de conceitos termodinâmicos) e técnicas experimentais levou ao entendimento de que estes processos são, em maior parte, físicos e ocorrem de uma forma simultânea e interdependente, como elos de uma corrente (GARDNER, 1960; COWAN, 1965). Este sistema unificado foi denominado de "SPAC" ou o "continuum" solo-planta-atmosfera (PHILIP, 1966). Firmou-se, então, o conceito de potencial químico da água, tanto no solo (TAYLOR e ASHCROFT, 1972), na planta (SALISBURY e ROSS, 1969), como atmosfera (MONTEITH, 1975).

O movimento da água no solo, na planta e na atmosfera ocorre devido ao decréscimo do potencial químico total em cada segmento, podendo ser descrito por equações de fluxo (RICHARDS, 1931; GARDNER, 1958; GARDNER, 1963). O potencial químico é uma medida da energia livre que o sistema dispõe para realizar trabalho, isto é, reter ou movimentar água.

Equipamentos diversos têm sido construídos para medida direta ou indireta do potencial químico da água no sistema solo-planta-atmosfera. Para o solo, é comum o uso de tensiômetros (RICHARDS, 1965); em laboratório, o sistema de câmara de pressão de Richards (RICHARDS, 1965) e o funil de placa porosa de Buchner. As unidades de potencial da água mais utilizadas são as unidades de energia por unidade de massa ( $\text{Joule.Kg}^{-1}$ ), por unidade de volume ( $\text{Joule.m}^{-3}$ ) ou por unidade de peso ( $\text{Joule.N}^{-1}$ ). Por facilidade de medida e cálculo, a unidade de energia por unidade de peso é a de maior emprego em cálculos de balanço hídrico, irrigação, etc., pois representa uma coluna (altura) de líquido (LIBARDI, 1984; ROSE, 1966;

REICHARDT, 1975).

A precipitação é o resultado final, já em retorno ao solo, do vapor d'água que se condensa na atmosfera, forma gotas de tamanho suficiente para quebrar a tensão e cair (OMETTO, 1981). A distribuição das chuvas é irregular, principalmente em condições tropicais. Quando a precipitação é insuficiente para o desenvolvimento das culturas, pode-se fornecer água suplementar via irrigação. A utilização das técnicas corretas na medida da precipitação e irrigação implica num erro médio de medida de 5% (DOWNEY, 1972).

A evapotranspiração é dos fatores mais estudados no balanço hídrico.

Segundo LEMON (1965), o processo evaporativo da água de um solo nu, submetido a condições atmosféricas constantes, divide-se em três fases. No primeiro estágio, o fluxo de água perdido por evaporação é constante e independe da umidade média do perfil; as condições meteorológicas governam o processo. No segundo estágio, as condições do solo comandam a evaporação, sendo a perda d'água uma função da umidade média do perfil. No terceiro estágio, o fluxo de água é bastante lento e uma fração considerável de água move-se na forma de vapor por difusão (REICHARDT et alii, 1972). A transpiração é um processo de perda d'água pelos organismos vegetais através da cutícula, estômatos, raízes e lenticelas para a atmosfera. A diferença de potencial da água entre as folhas e a atmosfera chega a ser de centenas de bares, ao passo que entre o solo e a atmosfera pode exceder 1000 atmosferas (HILLEL, 1980).

O processo de evaporação da água do solo e transpiração das culturas ocorrem simultânea e interdependentemente, daí a utilização do termo evapotranspiração.

A comparação da evapotranspiração das culturas sob diferentes condições edafoclimáticas é feita através de coeficientes e/ou modelos agrometeorológicos. Os coeficientes mais utilizados são a evaporação do Tanque Classe A (U.S. Weather Bureau) e a evapotranspiração calculada pelo método de PENMAN (1948).

PENMAN (1956) definiu a evapotranspiração potencial de uma cultura como sendo "a quantidade de água perdida por unidade de tempo, por uma cultura verde, sombreando completamente o solo, de altura pequena e uniforme e nunca sofrendo falta d'água".

O método de Penman, ou método combinado, associa o balanço de energia com a aproximação termodinâmica. OMETTO (1981) apresenta uma simplificação do método de Penman, com tabelas para a obtenção dos vários parâmetros da equação e uma equação de regressão para o cálculo da radiação líquida levando em consideração a radiação global solar da área.

A transpiração das culturas, em condições ótimas de umidade do solo, é governada pela demanda atmosférica e decresce linearmente com o secamento do solo. O ponto de passagem de uma situação a outra depende da condutividade hidráulica do solo não saturado, ocorrendo principalmente na faixa de tensão de 1 a 10 bars (GARDNER e EHLIG, 1963; GARDNER, 1960; COWAN, 1965). De modo contrário, para Newman (1969) citado por BERGAMASCHI (1984), a condutividade hidráulica em um solo não saturado tem importância no fluxo de água somente quando a umidade do solo corresponde a uma tensão próxima de 15 bars.



Van Bavel (1967) , citado por ROSENBERG (1974), encontrou queda na transpiração da alfafa quando o potencial matricial do solo atingiu -4 bars, para milho -0,2 bar e -10 bars para algodão.

MILLAR (1984), em uma revisão sobre manejo racional de irrigação para diferentes culturas, verificou que a maioria delas requer irrigação antes do potencial matricial atingir -0,7 bar na zona efetiva do sistema radicular. Para milho, cita trabalho de TAYLOR (1965), no período vegetativo, o potencial matricial deve ser inferior a -0,5 bar e na maturação, inferior a -8 bar; para feijão no ciclo total, o potencial matricial deve estar entre -0,75 e -2 bars.

O efeito do estresse hídrico nas plantas altera o seu desenvolvimento, modificando sua fisiologia, morfologia e, principalmente, afetando as reações bioquímicas a nível celular (KRAMER, 1969).

A queda de umidade do solo, segundo TAYLOR (1983), reduz a taxa de alongação do sistema radicular, aumenta a pilosidade, decresce a condutividade hidráulica, reduz o diâmetros das raízes e o contato raiz-solo, reduz o potencial matricial no solo ao redor de uma raiz específica, o que reduz o gradiente de potencial total entre a água do xilema e do solo e, provavelmente, a suberização do sistema radicular. Decréscimo no potencial matricial de -0,35 para -2,5 bar no solo, implicou no decréscimo na alongação da folha de milho de 44%, aumento na concentração de carboidratos

solúveis de 42%, decréscimo de 26% na acumulação de matéria seca e 24% da transpiração (BARLOW et alii, 1976).

Segundo DOWNEY (1972), os três métodos mais utilizados na medida da evapotranspiração são: balanço hídrico num volume de solo, com medidas periódicas da umidade do solo; lisímetros; balanço de energia. Qualquer um destes métodos possui erros em suas estimativas da evapotranspiração. Os lisímetros apresentam os resultados mais precisos, pois as medidas podem ser feitas em intervalos de horas, semanais, mensais e sazonais, dependendo do lisímetro utilizado (VILLA NOVA, 1973; VIETS JR., 1976), além de possibilitar medidas da evapotranspiração e drenagem profunda simultânea e independentemente (BARRADA, 1971).

Segundo Slatyer (1968) , citado em BLAD (1983), as vantagens do balanço hídrico, comparado a medidas de fluxo de vapor d'água, é a facilidade de obtenção, processamento e integração dos dados obtidos no campo; as desvantagens são a relativa baixa precisão e as dificuldades de medida da evapotranspiração em períodos chuvosos. É difícil medir mudanças na umidade do solo com precisão maior do que  $\pm 2$  mm de água, impedindo seu uso para medidas diárias da E.T. Em áreas extensas, o problema não é com o método do balanço hídrico e sim na falta de bons valores médios das entradas e saídas devido a variações na precipitação e nas características físicas, hídricas e químicas do solo.

BERGAMASCHI (1984) obteve valores superestimados de evapotranspiração da cultura de milho e aponta como fonte de erros a não medida do deflúvio superficial, utilização de uma só equação para o cálculo da drenagem profunda para uma área de 3600 m<sup>2</sup> e a dificuldade de determinação da variação de armazenamento na camada de 0-15 cm.

A drenagem profunda, devido à complexidade de determinação, geralmente é negligenciada ou incluída como parte do armazenamento de água ou evapotranspiração da cultura (ROSE, 1966).

DOWNEY (1971), KALMA e STANHILL (1969) obtiveram valores de drenagem profunda da ordem de 15 a 20% da água aplicada à cultura; VACHAUD et alii (1973) encontraram valores de drenagem da mesma ordem de grandeza que a evapotranspiração.

BLACK et alii (1970) afirmam que o intervalo de tempo para a obtenção de dados de umidade do solo para o cálculo da drenagem profunda e armazenamento de água deve ser variável. No caso de chuvas intensas, quando a drenagem profunda é grande, o intervalo entre as leituras deve ser o mais breve possível, várias vezes no mesmo dia, espaçando conforme o solo for secando. Ao contrário, ROUSE e WILSON (1971/72) calcularam o balanço hídrico num período de 25 dias com a cultura de milho, utilizando tensiômetros e sonda de nêutrons; a estimativa da evapotranspiração foi tão mais precisa quanto maior foi o valor da variação de armazenamento. Em períodos de alta evapotranspiração e sem precipitação, o método do balanço hídrico fornece as melhores estimativas da ET. Em períodos de alta precipitação, onde a variação de armazenamento é nula ou positiva e períodos de baixa evapotranspiração, o intervalo de amostragens deve ser maior que uma semana, de forma a se ter valores ra-

zoáveis de evapotranspiração. A maior parte dos erros na estimativa da ET deriva da determinação da variação de armazenamento na camada arável do solo. A não medida do deflúvio superficial, mesmo em áreas praticamente planas, é outra fonte de erro, superestimando a ET da cultura. A drenagem profunda calculada por estes dois autores foi 9% da evapotranspiração total da cultura.

Além do intervalo de amostragens e das influências do deflúvio superficial e armazenamento de água, a umidade volumétrica (HOLMES, 1967; SAUNDERS et alii, 1978), a densidade global (TAYLOR et alii, 1961) e o potencial hidráulico da água no solo (SOUZA et alii, 1979) são fontes de erro no cálculo do balanço hídrico.

## 2.2. Características fisiológicas e hídricas do feijoeiro

A cultura do feijoeiro é originada da região semi-tropical da América Central, onde a média de precipitação é de 500 a 1800 mm. Dentre as fases de desenvolvimento da cultura, a floração e a maturação das vagens são mais influenciadas pela precipitação do que pelo comprimento do dia. O máximo desenvolvimento da cultura ocorre quando a temperatura média é de 20-25°C, sofrendo quando esta excede 25°C ou é inferior a 15°C. O feijoeiro prefere solos ricos e bem drenados. Média de precipitação local deve ser da ordem de 500 a 1000 mm. A cultura do feijoeiro é sensível à salinidade do solo (HALTERLEIN, 1983). O feijoeiro é uma planta de

rápido crescimento vegetativo. Vários autores têm demonstrado que o potencial matricial do solo menor que -1 bar na zona radicular afeta negativamente o desenvolvimento da cultura (BERGAMASCHI et alii, 1976; BURMAN e BOHMONT, 1961).

Segundo DOORENBOS e KASSAN (1979), as necessidades hídricas da cultura de feijão variam de 300 a 500 mm, variando conforme as condições de clima. O ciclo da cultura é dividido em cinco fases: 0 - estabelecimento (10-15 dias), 1 - vegetativo (20 - 25 dias), 2 - floração (15-25 dias), 3 - formação das vagens (25 - 30 dias) e 4 - maturação (20-25 dias), num total de 90 - 120 dias de ciclo. Os valores do coeficiente de cultura (Kc) para as diversas fases são: 0,3 - 0,4; 0,7 - 0,8; 1,05 - 1,20; 0,65 - 0,75, respectivamente. A eficiência de utilização de água (EUA) da cultura é da ordem de 0,3 a 0,6 Kg/m<sup>3</sup> em relação à produção de grãos com 10% de umidade. A distribuição do sistema radicular pode alcançar 1 - 1,5 m de profundidade, mas a absorção de água ocorre nos primeiros 50 a 70 cm do solo. O período crítico de desenvolvimento da cultura, se não houve estresse nas fases iniciais, é o período de polinização das flores; se houve estresse, a floração e formação de vagens são os mais críticos.

ROBINS e DOMINGO (1955) encontraram uma redução de 20% na produção de grãos quando estresse hídrico persistiu por 15 dias antes do florescimento, 18 - 22 dias durante o florescimento e aproximadamente 15 dias do amadurecimento das primeiras vagens. O mecanismo de redução da produção foi a redução do número de vagens (estresse antes do florescimento), redução no número de grãos por vagem (estresse durante o florescimento) e redução no peso dos grãos (estresse durante a maturação).

BLACK et alii (1970), em solo arenoso, estimam que em cultura de feijão de 350 mm (330 precipitação e 20 variação de armazenamento), 170 foram evapotranspirados e 180 mm foram drenados abaixo de 150 cm.

GARRIDO e TEIXEIRA (1979) avaliaram o efeito de diferentes níveis de água disponível (AD) na cultura de feijão e encontraram acréscimos no rendimento da ordem de 558 a 1371 Kg por hectare, quando a reposição de água passou de 20 para 80% da água disponível. O uso consuntivo médio da cultura foi de 4,17 mm/dia. Em outro experimento, GARRIDO et alii (1978) não encontraram diferenças no rendimento da cultura de feijão sob irrigação quando o potencial matricial medido em tensiômetros atingia -20, -40 e -60 cm de água. O sistema radicular localizava-se (90%) nos primeiros 60 cm de profundidade.

Segundo MILLAR e GARDNER (1972), o feijoeiro reduz o seu crescimento e transpiração quando o potencial matricial no solo é menor que -0,25 bar, e a -0,4 bar a taxa de transpiração é reduzida em 50%. A produção de matéria seca em seu experimento decresceu em torno de 47% quando o potencial matricial passou de -0,28 bar para -0,4 bar.

MAGALHÃES et alii (1979) aplicaram estresse hídrico em diferentes fases do desenvolvimento do feijoeiro cultivar IPA-74-19 e determinaram que a fase mais crítica do desenvolvimento da cultura foi o início da floração a plena de floração, onde o potencial matricial do solo era de -5 bars que causou uma redução de 36,85% no rendimento da cultura; na fase de pré-floração a início de floração, um estresse de água no solo de -7 bars causou uma redução de 20,49% no rendimento da cultura.

SILVEIRA e STONE (1979), calculando o balanço hídrico do feijoeiro em Latossolo Vermelho-Amarelo de cerrado, a 60 cm de profundidade, encontraram valores de evapotranspiração de 220,47 mm e 40,15 mm de drenagem profunda, sendo que a evapotranspiração e a drenagem profunda foram 62 e 11%, respectivamente da evaporação do Tanque Classe A. A evapotranspiração média foi de 2,94 mm/dia.

GUIMARÃES et alii (1982) avaliaram a evapotranspiração do feijão da "seca" em diferentes fases do desenvolvimento, com e sem irrigação, com diferentes populações de plantas; obtiveram medidas da ET da ordem de 1,96 - 2,14 mm/dia, 10 dias após a germinação, 5,27 a 7,26 mm/dia na floração e 0,79 a 1,45 mm/dia no início da maturação.

Giralt (1979) , citado por BERGAMASCHI (1984), determinou a evapotranspiração total do feijoeiro, a qual foi de 360-371 mm, com média de 3,27 a 3,47 mm/dia, em um ensaio de três anos.

REICHARDT e LIBARDI (1974), em solo Terra Roxa Estruturada, com a cultivar Carioca, obtiveram relações ET/ETP (Penman) de 0,5 da sementeira à emergência e 1,5 durante o máximo desenvolvimento da cultura e razões ET/ECA (corrigido) de 0,5 na fase inicial e 1,4 no pleno desenvolvimento da cultura. ENCARNAÇÃO (1980), trabalhando com evapotranspirômetros de nível freático constante, também com feijoeiro, cultivar Goiano Precoce, obteve razões ET/ETP variando de 0,7 na fase inicial de desenvolvimento vegetativo e 1,4 na fase de início de floração e enchimento de grãos e razões ET/ECA (corrigido) de 0,7 e 1,2 nos mesmos períodos, respectivamente.

Em solo TRe, cultivado com feijão, PAULA SOUZA et alii (1979) calcularam a drenagem profunda na profundidade de 120 cm e observaram que durante a época úmida (janeiro a março), a drenagem profunda foi responsável por cerca de 58,7% das perdas totais de água e 6,6% na época seca; o movimento de água foi sempre descendente.

Estudando o efeito de diferentes regimes de irrigação em feijão jalo EEP 558, GARRIDO et alii (1979) estimaram a evapotranspiração média entre 4,77 - 5,11 mm/dia.

BERGAMASCHI (1984), num trabalho intensivo de determinação da ET da cultura de feijão cultivar aroana, em Piracicaba, obteve valores de evapotranspiração total de 365 a 415 mm. A cultura retirou água de uma camada de 0-75 cm nos períodos de secamento do solo. Utilizou, neste trabalho, uma única equação para o cálculo da drenagem profunda na profundidade de 67,5 cm sendo que, parte dos dados de umidade tiveram que ser desprezados devido a problemas com os tensiômetros e o cálculo da variação de umidade do solo na camada arável. BERGAMASCHI (1984) obteve valores das relações ET/ECA e ET/ETP muito variados, sendo que a relação ET/ECA foi sempre inferior à ET/ETP. O máximo valor destas relações foi atingido 70 dias após a germinação (DAG); neste período, a relação ET/ETP foi de 1,4, diminuindo no final do ciclo. A relação ET/ECA teve valores de 0,4 e 0,6 e a razão ET/ETP foi de 0,6 a 0,8 após a maturação fisiológica.



### 2.3. Características fisiológicas e hídricas do milho

O milho é considerado a planta mais domesticada pelo homem; incapaz de viver por muito tempo como uma planta selvagem, é cultivado em diferentes condições ambientais. Nas Américas, é cultivado da latitude 58°N no Canadá à 35-40°S na América do Sul. É plantado do nível do mar a altitudes de 4000 m. Altos rendimentos são obtidos quando a temperatura varia de 24 a 32°C e não há estresse hídrico. A 10°C, o milho cresce pouco e acima de 32°C o fluxo de água para as raízes é insuficiente para atender à demanda da planta. Nos EUA, as melhores regiões não irrigadas que cultivam o milho têm uma precipitação média anual de 600 - 1000 mm (WALDREN, 1983).

Em áreas de precipitação anual média superior a 750 mm ou áreas irrigadas, o rendimento potencial pode exceder a 12500 Kg por hectare.

Em áreas de milho irrigado ou com alta pluviosidade, 64% da matéria seca radicular está nos primeiros 30 cm e 92% nos primeiros 90 cm do perfil do solo. Em condições de sequeiro, 39% da matéria seca radicular está nos 30 cm superiores e 70% nos 90 cm superiores do solo (MAYAKI et alii, 1976).

A cultura de milho responde à quantidade de água disponível no solo e não ao total de precipitação ou irrigação aplicada à cultura (WALDREN, 1983).

Segundo DOORENBOS e KASSAN (1979), as necessidades hídricas para a cultura de milho estariam entre 500 - 800 mm para uma produção de 7 - 9 ton/ha em regiões sub-tropicais, com temperatura média acima de 20°C. A eficiência de utilização de água pela

cultura em boas condições de umidade está entre 0,8 a 1,6 Kg/m<sup>3</sup> em relação à produção de grãos com 13% de umidade. O sistema radicular pode alcançar uma profundidade de até dois metros, mas 80% da água retirada pela cultura está nos primeiros 80-100 cm do solo.

O ciclo de desenvolvimento da cultura pode ser desdobrado em cinco fases: 0 - estabelecimento (15-25 dias); 1 - período vegetativo (25-40 dias); 2 - floração (15-20 dias); 3 - formação da espiga (35-45 dias) e 4 - maturação (10-15 dias), dando um total de 100-145 dias.

O coeficiente de cultura (Kc) para as diferentes fases de desenvolvimento são de 0,3-0,5 (15-30 dias), 0,7-0,85 (30-45 dias), 1,05-1,2 (30-45 dias), 0,8-0,9 (10-30 dias) e 0,55-0,6 na colheita.

Segundo Martin et alii (1976), citado por WALDREN (1983), a cultura de milho é uma das mais eficientes na utilização de água. A cultura necessita de 372 unidades de água por unidade de matéria seca produzida, comparada com 271 para o sorgo, 505 para o trigo, 562 para o algodão e 858 para a alfafa.

Em condições subótimas de umidade do solo, a planta de milho usa quase toda a água disponível; a sua eficiência de utilização de água está diretamente correlacionada com a produção. RITCHIE (1973) mediu a retirada de água do solo por uma cultura de milho em aproximadamente 80% da água disponível antes do início do controle estomático da transpiração.

ROBINS e DOMINGO (1953) observaram que a manutenção da umidade volumétrica no ponto de murchamento por dois dias durante o espigamento ou o período de polinização do milho acarretou decréscimo de 22% no rendimento, enquanto a prorrogação deste estado por 6 - 8 dias causou uma redução de 50% na produção da cultura.

REICHARDT et alii (1979) calcularam o balanço hídrico para milho em Latossolo de textura média, utilizando o método de ROSE e STERN (1967) e concluíram que a cultura de milho retirou mais de 50% de água dos primeiros 60 cm de solo. A drenagem profunda foi importante nos primeiros estádios de desenvolvimento da cultura, sendo 67% do total da precipitação nos primeiros 40 dias da cultura.

A evapotranspiração média foi de 3,41 mm/dia, bem abaixo da evapotranspiração potencial, que está em torno de 7 mm nessa época do ano em Piracicaba (SP).

CASTRO (1979) calculou a evapotranspiração da cultura de milho cultivar Cargill 111-X em Piracicaba (SP) e obteve altos índices de correlação entre a evapotranspiração real e a calculada pelo método de Penman. Na determinação da umidade, foram utilizados tensiômetros em diversas profundidades até 135 cm, curvas de retenção de água e o cálculo da drenagem profunda foi efetuado a 120 cm, utilizando uma equação baseada no método de HILLEL (1972).

MATZENAUER (1985) utilizou tensiômetros em evapotranspirômetros nas profundidades de 15, 30 e 45 cm para a determinação do  $K_c$  para a cultura de milho em duas épocas de semeadura. Os valores de  $K_c$  foram semelhantes nas diversas fases da cultura e que no ciclo total (semeadura-maturação fisiológica) variou de 0,70 a 0,75.

UNGER e STEWART (1983), numa revisão sobre manejo do

solo e eficiência do uso de água, encontraram para milho uso de água entre os valores de 130 a 571 cm de água e eficiência de uso de água entre 79 e 523 Kg.ha<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup>.

OSUJI (1984), em condições tropicais num solo Oxic Paleustalf, avaliou diferentes manejos de solo na retirada de água pela cultura de milho. Em períodos de seca, o cultivo do solo como plantio direto proporcionou os maiores rendimentos; a quantidade consumida pelas culturas não variou muito, mas a eficiência de utilização de água foi significativamente maior em plantio direto, variando de 76,34 Kg.ha<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup> a 118 Kg.ha<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup> e em preparo convencional, de 35,34 Kg.ha<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup> a 111,55 Kg.ha<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup>.

MANFRON (1985), avaliando duas condições de preparo do solo para milho (convencional e subsolagem) e três espaçamentos entre-linhas (0,70; 0,90 e 1,10 m) para uma população final de 50000 plantas/ha, não encontrou diferenças entre os tratamentos no que se refere à profundidade do sistema radicular e os diversos estádios fenológicos. A produção do tratamento com espaçamento 1,10 m foi superior aos outros, produzindo acima de 10 ton/ha, contra aproximadamente 8,2 ton/ha do espaçamento 0,90 m e 7,8 ton/ha do espaçamento 0,70.

A avaliação da distribuição do sistema radicular feito por CRUZ e TAMES (1972) num cultivar de milho híbrido irrigado, indicou que 60% da massa seca do sistema radicular estava nos primeiros 20 cm do solo; da mesma forma, ESPINOZA (1982) encontrou uma concentração do sistema radicular de 60-80% nos primeiros 40 cm do solo em três cultivares de milho híbrido.

BERTRAND e KOHNKE (1957) avaliaram o efeito da densidade global do solo na penetração do sistema radicular do milho.

Raízes de milho com cinco semanas, foram incapazes de penetrar em um subsolo de densidade global de  $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ ; entretanto, desenvolveram intensamente em subsolo com densidade global de  $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$  e cresceram satisfatoriamente em subsolos com densidade global entre  $1,3$  e  $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$ .

#### 2.4. Drenagem profunda

O fluxo de água por drenagem profunda ou ascensão capilar é calculado pela equação de Darcy. Em 1856, trabalhando com colunas de areia saturada, Darcy concluiu que o fluxo de água por unidade de área da coluna e na unidade de tempo é proporcional à diferença da carga piezométrica medida em dois pontos da coluna dividido pela distância entre os pontos em consideração. O coeficiente de proporcionalidade, condutividade hidráulica, é uma característica do meio poroso em transmitir o líquido.

SLICHTER (1898) combinou a equação de Darcy com a equação da continuidade e obteve a clássica equação de Laplace, que é a equação diferencial geral que rege o movimento da água em meios porosos saturados. A equação de Darcy é aplicada para solos em equilíbrio dinâmico.

BUCKINGHAM (1907) modificou a equação de DARCY (1856) adaptando-a para condições de fluxo não saturado. Introduziu os conceitos de condutividade hidráulica não saturada e de potencial matricial, verificando as relações funcionais entre os conceitos introduzidos e a umidade do solo.

SWARTZENDRUBER (1966,1969) prefere denominar a equação de Darcy de Buckingham-Darcy, em homenagem a Buckingham, mas sem esquecer o primeiro trabalho de Darcy.

Na literatura de Física de Solos, no entanto, a denominação de Equação de Darcy é utilizada indistintamente, tanto para condições saturadas como não saturadas.

O movimento da água em um meio poroso obedece à lei de conservação da massa; a aplicação desta lei pela equação da continuidade por RICHARDS (1931) redundou na equação diferencial geral que descreve o movimento não saturado de água em solos.

A partir de RICHARDS (1931), uma série de trabalhos e livros tem sido publicada sobre o movimento da água em solos (BEAR, 1969; CHILDS, 1969; KLUTE, 1972; HILLEL, 1972,1980; MILLER e KLUTE, 1967; SWARTZENDRUBER, 1966; REICHARDT, 1975; LIBARDI, 1984).

A relação entre a condutividade hidráulica e o potencial hidráulico tem sido muito estudada para resolver a equação de Richards. Os métodos de determinação da condutividade podem ser separados em condições de equilíbrio dinâmico, com diversos aparatos de laboratório para sua determinação (NIELSEN e BIGGAR, 1961), ou em condições transientes. O método do perfil instantâneo, tanto para condições de laboratório como de campo, tem sido muito utilizado em condições de não saturação do solo.

Segundo KLUTE (1972), este método parece ter sido aplicado pela primeira vez no laboratório por RICHARDS e WEEKS (1953), e no campo por RICHARDS et alii (1956). OGATA e RICHARDS (1957) utilizaram o mesmo procedimento de RICHARDS et alii (1956), com a diferença que permitiam o perfil do solo sofrer apenas o processo de drenagem, cobrindo sua superfície de tal maneira que o fluxo nesta

posição é sempre nulo.

O método do perfil instantâneo tem tido larga utilização na determinação da condutividade hidráulica em condições não saturadas (NIELSEN et alii, 1973; LIBARDI, 1980; REICHARDT e LIBARDI, 1974; ROSE e STERN, 1967; HILLEL, 1972). Poucos apresentam limitações ao seu uso. BAKER et alii (1974) enumeraram uma série de limitações ao método. Em situações de relevo ondulado, para que não ocorra fluxo lateral de água na parcela experimental, embora laborioso, é necessário isolar a parcela onde vai ser feita a determinação; solos que apresentam horizontes geneticamente densos ( $B_{2t}$ ) ou compactados devido ao manejo do solo, poderão não alcançar a saturação do perfil nas camadas mais profundas, portanto, não serão obtidos os valores de condutividade hidráulica para as faixas próximas à saturação.

NIELSEN et alii (1962) mediram o  $K(\theta)$  do solo utilizando as mesmas técnicas de OGATA e RICHARDS (1957), com exceção da utilizada para a medida da umidade, que foi a sonda de nêutrons. Este procedimento é o que tem sido mais utilizado em condições de campo, pela facilidade que a técnica da sonda de nêutrons oferece em ser não destrutiva, podendo-se citar os trabalhos de ROSE et alii (1965), Van BAVEL et alii (1968), VACHAUD et alii (1977) e, em nosso meio, os trabalhos de REICHARDT e LIBARDI (1974), GROHMANN et alii (1976) e SAUNDERS et alii (1978). Destes trabalhos, merece destaque o de HILLEL et alii (1972), pelo fato de apresentar um roteiro simples e completo do método do perfil instantâneo sob condições de campo.

Neste trabalho, HILLEL et alii (1972) assumiram uma relação exponencial entre a umidade volumétrica e a condutividade

hidráulica. Isto serviu de base para uma série de publicações (REICHARDT, 1974; LIBARDI, 1979; LIBARDI et alii, 1980; BRUNINI, 1981; WARRICK et alii, 1977; CHOUDHURY e MILLAR, 1983; PREVEDELLO et alii, 1981; SAUNDERS et alii, 1978; VAUCLIN et alii, 1982; PAULA SOUZA et alii, 1979; CAVALCANTE et alii, 1978).

PREVEDELLO et alii (1981), utilizando o método do perfil instantâneo, apresentaram uma simplificação analítica do método para o cálculo da função  $K(\theta)$  através de equações de regressão bi-logarítmicas dos dados de umidade e potencial matricial na redistribuição da água no perfil de diversos solos. CHOUDHURY e MILLAR (1983) utilizaram a metodologia descrita em HILLEL (1972) e obtiveram equações analíticas para a condutividade hidráulica em solo não saturado, num Latossolo Vermelho-Amarelo de Petrolina.

CAVALCANTE et alii (1978) utilizaram o mesmo procedimento de HILLEL et alii (1972) para estimativa da condutividade hidráulica em função da umidade do solo sob condições de laboratório, sendo que a medida da umidade do solo foi feita pela técnica da atenuação da radiação gama e o potencial matricial a partir da curva característica da água no solo.

Uma variante do método do perfil instantâneo é aquela de se considerar gradiente unitário, daí o nome consagrado "Método do Gradiente Unitário". Esta aproximação tem sido explorada por BLACK et alii (1965) e DAVIDSON et alii (1969), os quais a recomendam em solos identificados como homogêneos.

Devido às dificuldades envolvidas na medida direta da condutividade hidráulica, muitos pesquisadores têm procurado calculá-la a partir de outras propriedades do meio poroso de mais fácil medida. Assim, CHILDS e COLLIS-GEORGE (1950), MARSHALL (1958)



e MILLINGTON e QUICK (1959,1960,1961) têm procurado relacionar  $K(\theta)$  com a distribuição de tamanho dos poros do solo. Assim, REICHARDT et alii (1972), utilizando solos de clima temperado, e LIBARDI (1974) utilizando solos de clima tropical, determinaram  $K(\theta)$  através do método de BRUCE e KLUTE (1965), segundo o qual, basta possuir a curva de retenção de água no solo e a curva da difusividade versus umidade para se determinar a curva condutividade versus umidade.

NIELSEN et alii (1973) fizeram estimativas da condutividade hidráulica em função da umidade e profundidade do solo, numa área de 150 ha, dividida em 20 plotes de  $6,5 \text{ m}^2$ , assim como as propriedades de retenção do solo a cada 30 cm até 180 cm de profundidade, com vistas a estudar a variabilidade natural das propriedades do solo. A necessidade de um grande número de medidas e obtenção de amostras faz com que devamos utilizar métodos rápidos, simples mas não tão precisos (WARRICK et alii, 1977). O estudo da variabilidade natural do solo tem sido largamente estudado nos últimos anos. A procura de valores médios das características físicas e químicas do solo, assim como sua distribuição no espaço e no tempo é de interesse prático (BECKETT e WEBSTER, 1971). Parâmetros específicos, como condutividade hidráulica, armazenamento de água pelo solo, textura, densidade global e curvas de retenção, têm sido estudados e avaliada sua variação no campo (BABALOLA, 1978; BAKER, 1978; CAMERON, 1978; PATTERSON e WALL, 1982; VAUCLIN et alii, 1982; VIEIRA et alii, 1981; WANG, 1982).

LIBARDI et alii (1980) simplificaram o método do perfil instantâneo para descrever a condutividade hidráulica de modo analítico. A determinação da função  $K(\theta)$  por LIBARDI et alii (1980) pode ser feita por dois métodos; aquele que considera o gradiente

de potencial hidráulico (método de Hillel analítico) e o método que considera o gradiente de potencial unitário (método da umidade). A suposição de gradiente unitário é válida, já que o movimento descendente da água no processo de redistribuição após a saturação do perfil do solo é devido, principalmente, à ação da força gravitacional.

LIBARDI et alii (1979) concluíram que, embora o método da umidade não leve em consideração o gradiente potencial hidráulico, é perfeitamente utilizável quando se leva em conta a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo em condições de campo (NIELSEN et alii, 1973; WARRICK et alii, 1977). É fácil de se determinar a campo, já que somente os dados de umidade são necessários para a determinação dos parâmetros da equação da função  $K(\theta)$ . A este método, os autores chamaram de "método da umidade". Além disso, LIBARDI et alii (1980) introduzem em seu trabalho um outro método de determinação de  $K(\theta)$ , ao qual chamaram "método do fluxo".

Outro meio de determinar a função condutividade hidráulica em função da umidade do solo  $K(\theta)$  é aquela baseada na curva de retenção de umidade ( $\psi_m(\theta)$  ou  $\theta(\psi_m)$ ). A forma da curva de retenção é complexa; para estudos de dinâmica da água é necessário encontrar equações matemáticas que a descrevam.

A baixas tensões, menores que 1 bar, a forma das curvas é regida pela estrutura e porosidade do solo. Manejo do solo, matéria orgânica (KUMAR et alii, 1985), cátions trocáveis, solução do solo e outros fatores afetam esta faixa de umidade da curva de retenção de água do solo. A tensões altas, especialmente maiores que 5 bar, a textura do solo, particularmente o conteúdo de argila

determina a quantidade de água retida no solo.

A utilização de amostras com estrutura deformada para a elaboração da curva de retenção subestima a umidade volumétrica do solo em baixas tensões (menores que 0,2 atm), comparadas com amostras de estrutura indeformada (SALTER e WILLIAMS, 1965; ELRICK e TANNER, 1955).

A partir de dados de curva de retenção em solos de diferentes características físicas, é possível obter expressões que com relativa precisão forneçam a umidade volumétrica.

OOSTERVELD e CHANG (1980) e DE JONG e LOEBEL (1982), a fim de diminuir o número de determinações de laboratório com amostras de diferentes características físicas e hídricas, obtiveram equações de regressão para alguns pontos da curva de retenção em função da textura do solo. Alguns problemas foram encontrados nas equações devidos à distribuição textural e mineralogia dos solos, quando se comparavam os dados reais com os preditos pela equação.

DE JONG (1967) propôs uma equação polinomial da forma  $\theta = a + b (\log \psi_m) + c \log (\psi_m)^2$ , onde a, b, c são coeficientes de regressão. A equação apresentou problemas na determinação da umidade nas tensões próximas à saturação, superestimando os valores de umidade volumétrica. A fim de resolver este problema, desdobrou a curva de retenção em duas equações (DE JONG et alii, 1983) de regressão linear, da forma:

$$\theta = a + b_1 (\log \psi_m \cdot t) \quad \text{para } \psi_m < 10^t$$

$$\theta = a + b_2 (\log \psi_m \cdot t) \quad \text{para } 10^t \leq \psi_m$$

onde a é o valor de umidade volumétrica onde as duas equações se encontram;  $b_1$  e  $b_2$ , seus coeficientes angulares; t é o logaritmo

do potencial matricial na intersecção das duas retas. Este ponto estaria relacionado com fatores determinantes da estrutura da amostra de solo.

DE JONG (1982) e CLAPP e HORNBERGER (1982) utilizaram equações potenciais para representar a curva de retenção na forma:  $\psi(\theta) = \psi_s (\theta / \theta_s)^{-b}$ , onde  $\psi_s$  e  $\theta_s$  são umidade e potencial matricial de "saturação", e b, constante do solo. As análises de regressão mostraram bons resultados para a maioria dos grupos texturais de solos, exceção aos de textura barro-arenosa e argilo-barrenta; entretanto, as equações obtidas, concluem os autores, são pouco aplicáveis a solos específicos, não tendo caráter geral.

WALL e MILLER (1983), através de dados de redistribuição de água, otimizaram equações de condutividade hidráulica em condições não saturadas  $K(\theta, z)$  e curva de retenção  $\psi_m(\theta, z)$  através da técnica de regressão não linear pela técnica dos quadrados mínimos. Neste trabalho, foram utilizadas equações não lineares para curva de retenção da forma:

$$\psi_m = -(A + B/\theta^C)$$

onde A, B, C são constantes do método de MARSHALL (1958) para a condutividade hidráulica. Os valores obtidos foram melhores de uma ordem de magnitude do que os dados obtidos em condições de laboratório em relação aos dados de campo.

ROULIER et alii (1972) obtiveram equações de condutividade hidráulica a partir de amostras com estrutura indeformada em laboratório. Em campo, utilizou o método de drenagem interna com tensiômetros e sonda de nêutrons. Foram utilizadas a teoria de MARSHALL (1958) e a equação de MILLINGTON e QUIRK (1959), aproveitando os dados da curva de retenção do laboratório elaborada com a-

mostras com estrutura indeformada e os dados de campo de drenagem interna do perfil.

ROULIER et alii (1972) assumiram uma relação exponencial entre a umidade volumétrica ( $\Theta$ ) e o potencial matricial ( $\psi_m$ ) da forma:

$$\Theta(\psi_m) = a / (\psi_m)^b$$

onde a e b são constantes. Os resultados encontrados foram satisfatórios.

VAN GENUCHTEN e NIELSEN (1985) fazem uma excelente revisão sobre várias equações encontradas na literatura que representam a curva de retenção de água do solo e sua utilização para descrever a função  $K(\Theta)$ . São citados os modelos de BROOK e COREY (1964), VISSER (1968), LALIBERTE (1969) e, recentemente, VAN GENUCHTEN (1980). As curvas de retenção possuem geralmente a forma de um "S", que se distorce conforme as características físicas do solo (GARDNER, 1983), principalmente a textura e estrutura.

VAN GENUCHTEN (1978) propôs uma nova equação para descrever a condutividade hidráulica de solos não saturados, que utiliza os dados de curva de retenção. O autor adotou para a curva de retenção uma equação da forma

$$\Theta = \Theta_r + \frac{\Theta_s - \Theta_r}{(1 + (\alpha\psi_m)^n)^m}$$

onde  $\Theta_r$  e  $\Theta_s$  são umidade volumétrica residual (assumida ser a determinada a  $\psi_m = -1,5$  MPa) e saturada, respectivamente;  $\alpha, n, m$  são parâmetros a serem determinados graficamente ou, mais apropriadamente, por regressão não linear pela técnica dos quadrados mínimos.

O parâmetro  $n$  aumenta com o teor de areia, variando

de 1,5 a 2 para solos argilosos e textura média, e de 5 a 10 ou mais para solos arenosos;  $m$  é geralmente menor que 1 (GARDNER, 1983).

A partir do modelo da função  $\Theta(\psi_m)$  foi obtida a função  $K(\Theta)$ , com base nos trabalhos de MUALEM (1976), BURDINE (1953) e BROOKS e COREY (1966) fornecendo a condutividade hidráulica relativa representada por  $K_r = K/K_A$ , onde  $K$  é a condutividade hidráulica do solo não saturado e  $K_A$  é a condutividade hidráulica do solo saturado, determinada na amostra indeformada utilizada na elaboração da curva de retenção de água do solo.

VAUCLIN et alii (1982) avaliaram os métodos de LIBARDI et alii (1980) e VAN GENUCHTEN (1978) para determinar a condutividade hidráulica de solos do Senegal e concluíram que, apesar do modelo de VAN GENUCHTEN ter representado bem os dados da função  $\Theta(\psi_m)$ , superestimou os dados da função  $K(\Theta)$ , ao passo que LIBARDI et alii (1980) subestimou os valores da função  $K(\Theta)$ , mas destacou a facilidade deste método por só utilizar dados de umidade do processo de redistribuição de água.

INOUE et alii (1984), comparando diversas equações para calcular a condutividade hidráulica, utilizaram, para descrever a curva de retenção, a equação descrita por VAN GENUCHTEN (1980) que representou bem os dados a baixas tensões ( $\psi_m > -100$  cm de água). Os valores encontrados para os parâmetros  $\alpha, n, m$  do solo arenoso de duna foram de 0,044; 10,71 e 0,511.

DANE (1980) avaliou vários métodos de determinação da condutividade hidráulica. Dentre estes, o método de VAN GENUCHTEN (1980) que calcula  $K(\Theta)$  em função de  $\psi_m(\Theta)$  determinada em laboratório e LIBARDI et alii (1980) que determina  $K(\Theta)$  a partir de análise de redistribuição da água em condições de campo previamente

saturado e que é prevenida a evaporação da superfície do solo. Concluiu que o método de LIBARDI et alii (1980), desenvolvido para solos de textura fina, pode ser estendido para solos de textura grossa e que o método de VAN GENUCHTEN (1980) representou bem os dados tanto de condutividade hidráulica  $K(\theta)$  como o de curva de retenção  $\psi_m(\theta)$ . A dificuldade da utilização do método para determinação da função  $K(\theta)$  por VAN GENUCHTEN (1980) está na suposição de que a condutividade hidráulica do solo saturado determinada nas amostras utilizadas para a obtenção da função  $\psi_m(\theta)$  represente os valores reais de campo.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Descrição da área

O presente experimento foi desenvolvido em área do município de Piracicaba, Estado de São Paulo. O campo experimental localiza-se junto ao Posto Agrometeorológico do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP, cujas coordenadas geográficas são 22°42'30" de latitude sul e 47°38'00" de longitude oeste. O local se encontra a 580 m acima do nível do mar e possui os seguintes valores médios das normais meteorológicas: 1247,1 mm.ano<sup>-1</sup> de precipitação pluviométrica; 20,8°C de temperatura média; 69% de umidade relativa do ar; 2,5 m.sec<sup>-1</sup> de velocidade do vento e 7 horas.dia<sup>-1</sup> de insolação (CERVELLINI et alii, 1973; VILLA NOVA et alii, 1973).

#### 3.2. O solo

O solo utilizado para a presente pesquisa, segundo a Carta de Solos de Piracicaba (RANZANI et alii, 1966) pertence ao Grande Grupo Terra Roxa Estruturada, Série Luiz de Queiroz. Pelo sistema americano de classificação (USDA, 1975), está dentro da ordem dos Alfisóis, sendo um Paleudalf Óxico. É um solo



formado a partir do intemperismo de um Basalto (Grupo São Bento), e seu material originário pode ser definido como produto de meteorização de sedimentos (SOUZA, 1978). A Terra Roxa Estruturada representa cerca de 1,1% dos solos do Estado de São Paulo e 6,1% da área do município de Piracicaba.

### 3.2.1. Caracterização física

Foi aberta uma trincheira (1 x 2 x 2 m) ao lado da parcela experimental (10 x 10 m), onde foram retiradas amostras com estrutura indeformada a cada 15 cm até 150 cm de profundidade, com anéis de bordos cortantes, com quatro repetições, para determinar a densidade global do solo ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) pelo método do anel volumétrico (BUCKMAN e BRADY, 1969; BLAKE, 1965). A análise granulométrica e a determinação da densidade das partículas do solo foram feitas em amostras deformadas de cada camada, retiradas do mesmo local e ao lado de onde foram retiradas as amostras indeformadas. As frações granulométricas foram determinadas pelo método da pipeta, descrito por KILMER e ALEXANDER (1949); a classe textural das diversas camadas estudadas e a distribuição percentual da sua composição granulométrica foi feita no Departamento de Solos, Geologia e Fertilizantes da ESALQ/USP, que utiliza o sistema de classificação do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América do Norte (SOIL SURVEY STAFF, 1951; EMBRAPA, 1979).

Os resultados das características físicas do solo estão apresentados na Tabela 1, que mostram ser um solo de classe textural argila (camada 0-15, 105-150 cm) a muito argilosa (30 - 90 cm) com densidade global variando de 1,54 a  $1,21 \text{ g.cm}^{-3}$ . As densidades

TABELA 1 - Características físicas do solo Terra Roxa Estruturada. Valores são média de três repetições (desvio padrão).

| Prof.<br>(cm) | Granulometria |             |             | Densidade<br>Global<br>$\rho_g$ (g.cm <sup>-3</sup> ) | Densidade<br>Partículas<br>$\rho_p$ (g.cm <sup>-3</sup> ) | Porosidade<br>Total<br>$\alpha$ (%) |
|---------------|---------------|-------------|-------------|---|---|-------------------------------------|
|               | % Areia       | % Limo      | % Argila    |   |   |                                     |
| 15            | 31,92(0,32)   | 19,51(0,54) | 48,53(0,88) | 1,54(0,02)  | 2,83(0,00)  | 45,47                               |
| 30            | 23,80(0,17)   | 15,19(0,31) | 61,01(0,23) | 1,43(0,02)  | 2,79(0,02)  | 48,59                               |
| 45            | 21,33(0,06)   | 14,98(0,40) | 63,52(0,49) | 1,40(0,01)  | 2,81(0,03)  | 50,25                               |
| 60            | 21,65(0,36)   | 15,39(0,42) | 62,96(0,68) | 1,38(0,01)  | 2,80(0,00)  | 50,73                               |
| 75            | 22,27(0,38)   | 15,57(0,86) | 62,16(1,13) | 1,25(0,01)  | 2,74(0,02)  | 54,20                               |
| 90            | 22,04(0,68)   | 15,98(0,77) | 61,95(0,51) | 1,23(0,01)  | 2,75(0,01)  | 55,15                               |
| 105           | 23,60(0,21)   | 17,01(0,05) | 59,39(0,24) | 1,20(0,01)  | 2,78(0,03)  | 56,70                               |
| 120           | 24,01(0,31)   | 17,64(1,08) | 58,35(1,30) | 1,23(0,01)  | 2,78(0,02)  | 55,82                               |
| 135           | 24,45(0,05)   | 17,98(0,95) | 57,57(0,99) | 1,21(0,01)  | 2,79(0,02)  | 56,66                               |
| 150           | 24,78(0,11)   | 18,95(0,56) | 56,27(0,67) | 1,21(0,01)  | 2,79(0,02)  | 56,72                               |

mais altas são encontradas nos horizontes superficiais, onde se encontra a camada arável e o horizonte B-textural característico desta classe de solos ( $\approx 60$  cm). A densidade global decresce conforme passamos do horizonte B-textural para o horizonte B-óxico. Embora tão argiloso quanto o horizonte B-textural, o horizonte B-óxico possui características de retenção e condução de água bem diferentes, que podem ser observadas pela maior porosidade total ( $\alpha\%$ ) e pelas curvas de retenção de água descritas adiante.

### 3.2.2. Caracterização química

Para o plantio das culturas, foram feitas análises químicas de macro e micronutrientes do solo, para proceder-se à adubação e correção do terreno. As análises foram efetuadas com amostras deformadas de solo, retiradas da trincheira e determinadas segundo a metodologia de rotina do Departamento de Solos, Geologia e Fertilizantes da ESALQ/USP. A reação do solo (pH) foi determinada potenciométricamente em suspensão (1:1) de solo com água; o carbono orgânico, pelo método de Walkley e Black, descrito por JACKSON (1976); o N total, pelo método semi-micro Kjeldahl, descrito por BREMNER (1965a); a relação C/N, pela divisão do carbono orgânico pelo nitrogênio total; o fósforo solúvel, pelo método fotolorimétrico após extração com  $H_2SO_4$  0,05N; cálcio e magnésio trocáveis, por espectrometria de absorção atômica, após extração com uma solução de KCl 1N; o potássio e o sódio trocáveis foram determinados por fotometria de chama, após extração com solução de HCl 0,05N; o alumínio trocável, por titulação com solução NaOH 0,02N, após extração com solução de KCl 1N; e o hidrogênio trocável, titulado com

NaOH 0,02N, após extração com acetato de cálcio 1N, ajustado a pH 7,0. Além destas análises, foram calculadas a capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva e a porcentagem de saturação de bases (V%).

Na Tabela 2 estão os resultados destas características químicas do solo. Pode-se dizer que é um solo rico em nutrientes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ), com alguns problemas de acidez na camada arável (pH = 4,7), devido à presença de alumínio trocável (0,6 emg/100 g solo), mas passíveis de correção, não apresentando limitações químicas ao desenvolvimento radicular da cultura em subsuperfície, com saturação de bases (V%) acima de 50% abaixo de 30 cm.

### 3.3. Parcela experimental

O experimento foi instalado numa área de declividade inferior a 3%, não necessitando de práticas de conservação para evitar problemas com erosão do solo e deflúvio superficial da água que entrar no sistema (HUDSON, 1971).

A área delimitada para a instalação dos equipamentos era de 5 x 5 m, com uma bordadura de 5 m, resultando numa área total de 100 metros quadrados, considerada suficientemente grande a ponto de evitar que os processos em seu centro não sejam influenciados pelos seus limites (HILLEL et alii, 1972).

Para determinação da umidade volumétrica ( $\theta$ ,  $\text{cm}^3, \text{cm}^{-3}$ ) e do potencial matricial ( $\psi_m$ ,  $\text{cm H}_2\text{O}$ ), foram instalados tensiômetros nas diversas profundidades (Figuras 1 e 2). Instalados os equipa-

TABELA 2 - Resultados das análises de algumas características químicas do perfil do solo Terra Roxa Estruturada.

| Prof.<br>(cm) | pH<br>H <sub>2</sub> O<br>(1:1) | C.O.<br>% | M.O.<br>% | Teor Trocável emg/100 g Terra |                |                  |                  |                 |                  | Bases          |      |      |
|---------------|---------------------------------|-----------|-----------|-------------------------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|----------------|------|------|
|               |                                 |           |           | PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> | Al <sup>3+</sup> | H <sup>+</sup> | CTC  | V %  |
| 0-15          | 5,4                             | 0,78      | 1,35      | 0,15                          | 0,56           | 2,00             | 1,36             | 0,10            | 0,12             | 4,32           | 8,61 | 48,4 |
| 15-30         | 4,7                             | 0,66      | 1,14      | 0,09                          | 0,76           | 1,20             | 0,65             | 0,07            | 0,60             | 5,44           | 8,81 | 31,4 |
| 30-45         | 5,1                             | 0,42      | 0,73      | 0,08                          | 0,48           | 2,36             | 0,99             | 0,05            | 0,09             | 3,20           | 7,25 | 54,6 |
| 45-60         | 5,4                             | 0,27      | 0,47      | 0,06                          | 0,40           | 2,40             | 0,99             | 0,05            | 0,09             | 2,72           | 6,73 | 58,3 |
| 60-75         | 5,6                             | 0,33      | 0,57      | 0,04                          | 0,28           | 2,65             | 1,02             | 0,04            | 0,08             | 2,40           | 6,53 | 62,0 |
| 75-90         | 5,7                             | 0,24      | 0,42      | 0,07                          | 0,20           | 2,80             | 1,04             | 0,04            | 0,09             | 2,16           | 6,37 | 64,7 |
| 90-105        | 5,4                             | 0,30      | 0,52      | 0,06                          | 0,16           | 3,04             | 0,96             | 0,02            | 0,08             | 2,32           | 6,65 | 63,9 |
| 105-120       | 5,6                             | 0,24      | 0,42      | 0,04                          | 0,14           | 2,96             | 1,04             | 0,02            | 0,08             | 2,32           | 6,62 | 63,8 |
| 120-135       | 5,7                             | 0,21      | 0,36      | 0,04                          | 0,08           | 2,96             | 0,88             | 0,01            | 0,08             | 1,84           | 5,89 | 67,4 |
| 135-150       | 5,7                             | 0,12      | 0,21      | 0,04                          | 0,06           | 3,12             | 0,64             | 0,01            | 0,08             | 1,84           | 5,79 | 66,8 |

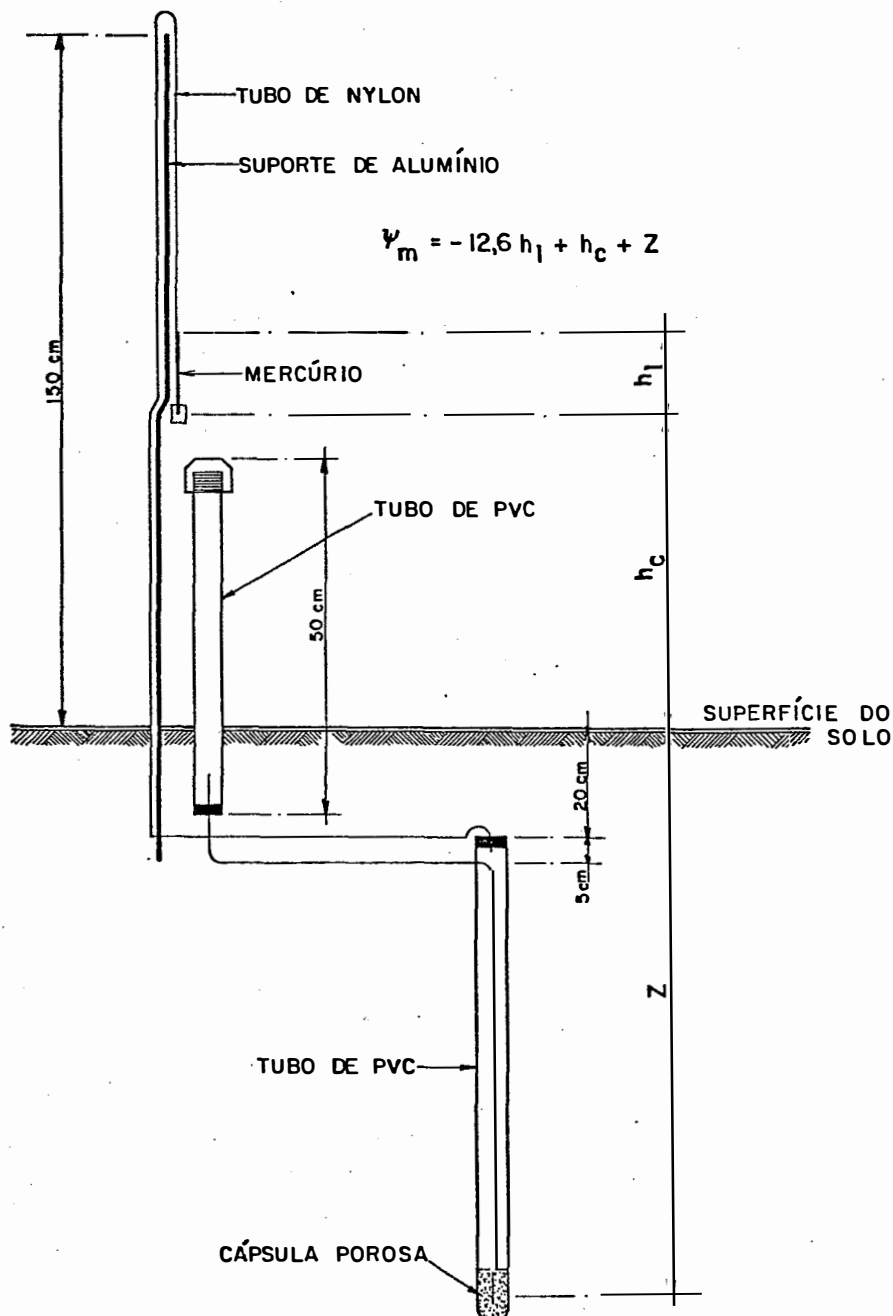
mentos, foram determinadas as características hídricas do solo (condutividade hidráulica do solo saturado,  $K_0$ , e não saturado,  $K(\theta)$  ou capilar. Após estas determinações, foi plantada uma cultura de feijão (Phaseolus vulgaris L.) e, após esta, uma cultura de milho (Zea mays L.). Foi efetuado o balanço hídrico para cada cultura (Figuras 3 e 4).

Junto à parcela experimental, está localizado o Posto Agrometeorológico, onde foram obtidos os dados de precipitação, evaporação Tanque Classe A, insolação, radiação global, umidade relativa, temperatura e velocidade do vento, necessários ao acompanhamento dos fatores do clima, influentes no desenvolvimento daquelas culturas (OMETTO, 1981) e necessários ao cálculo da evapotranspiração potencial pelo método de PENMAN (1948) e Tanque Classe A.

### 3.4. Equipamento utilizado

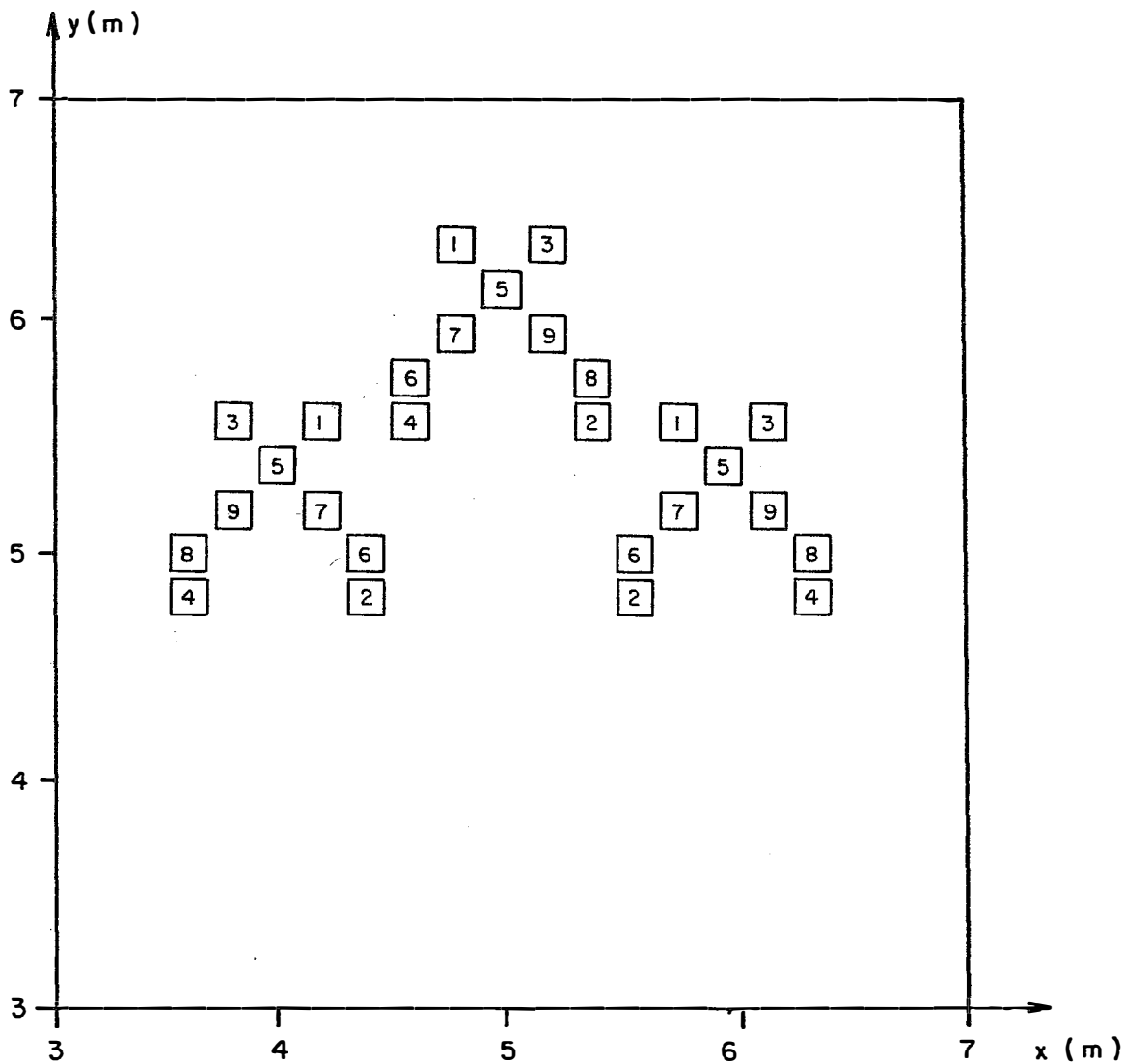
#### 3.4.1. Na parcela experimental

3.4.1.1. Tensiômetros - Foram instaladas três baterias de nove tensiômetros, instalados a cada 15 cm de profundidade, a partir de 30 cm da superfície do solo (30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150 cm) - Figura 2. Os tensiômetros foram construídos com tubo de plástico PVC, rígido, com diâmetro de 21 mm externo e 15 mm interno, e comprimento variável de acordo com a profundidade de interesse, tubo de nylon flexível, cápsula porosa de cerâmica, com 6 cm de comprimento e diâmetro equivalente ao do PVC, rolha de borra-



### TENSIÔMETRO

FIGURA 1 - Tensiômetro, componentes e determinação do potencial matricial ( $\psi_m$ ).



|                |    |    |    |    |    |     |     |     |     |
|----------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| Nº Tensiômetro | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6   | 7   | 8   | 9   |
| Profundidade   | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 105 | 120 | 135 | 150 |

FIGURA 2 - Esquema de distribuição dos tensiômetros, segundo a profundidade da cápsula porosa na parcela experimental.



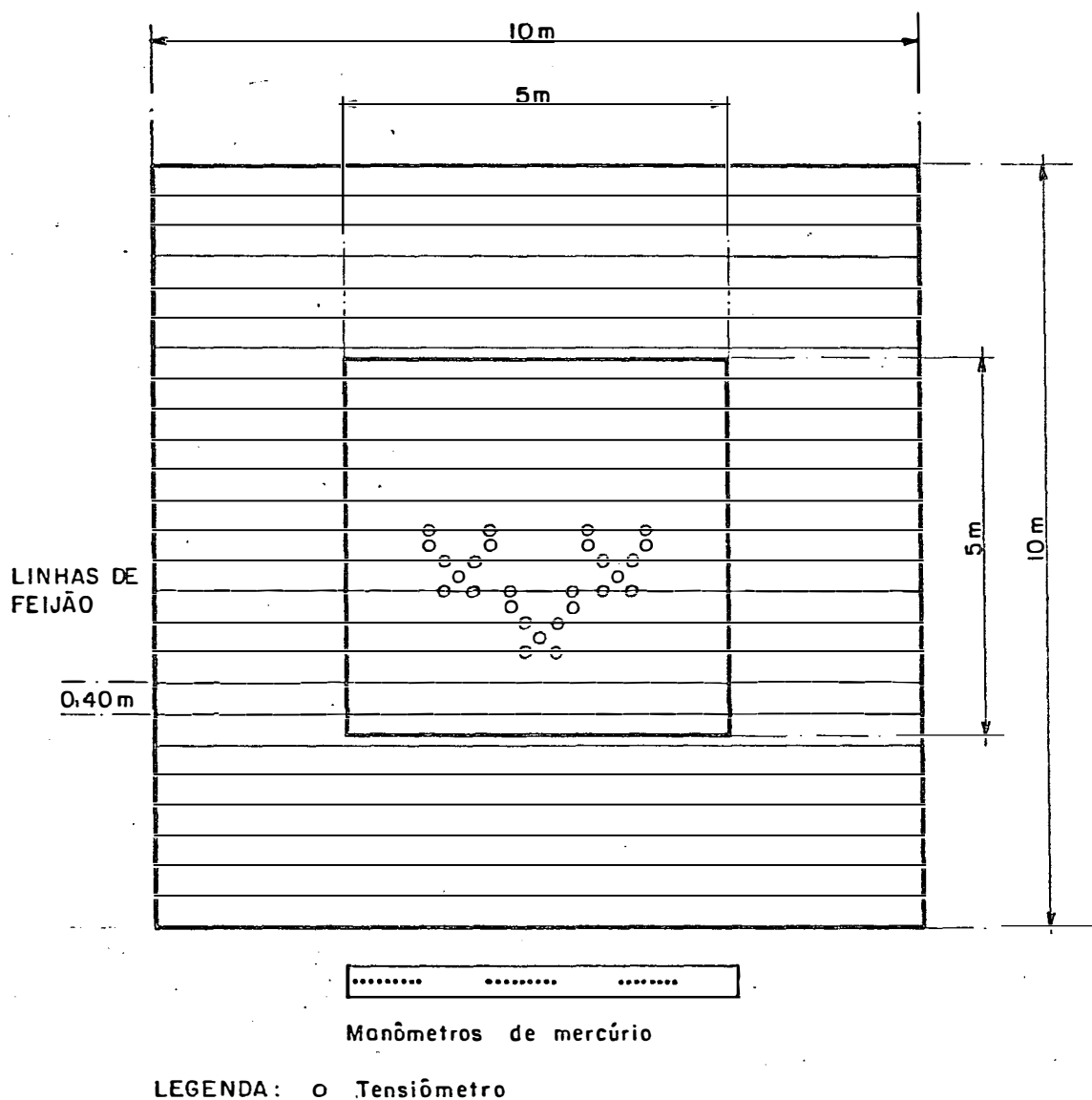


FIGURA 3 - Esquema de distribuição da cultura de feijão em relação aos equipamentos na parcela experimental.

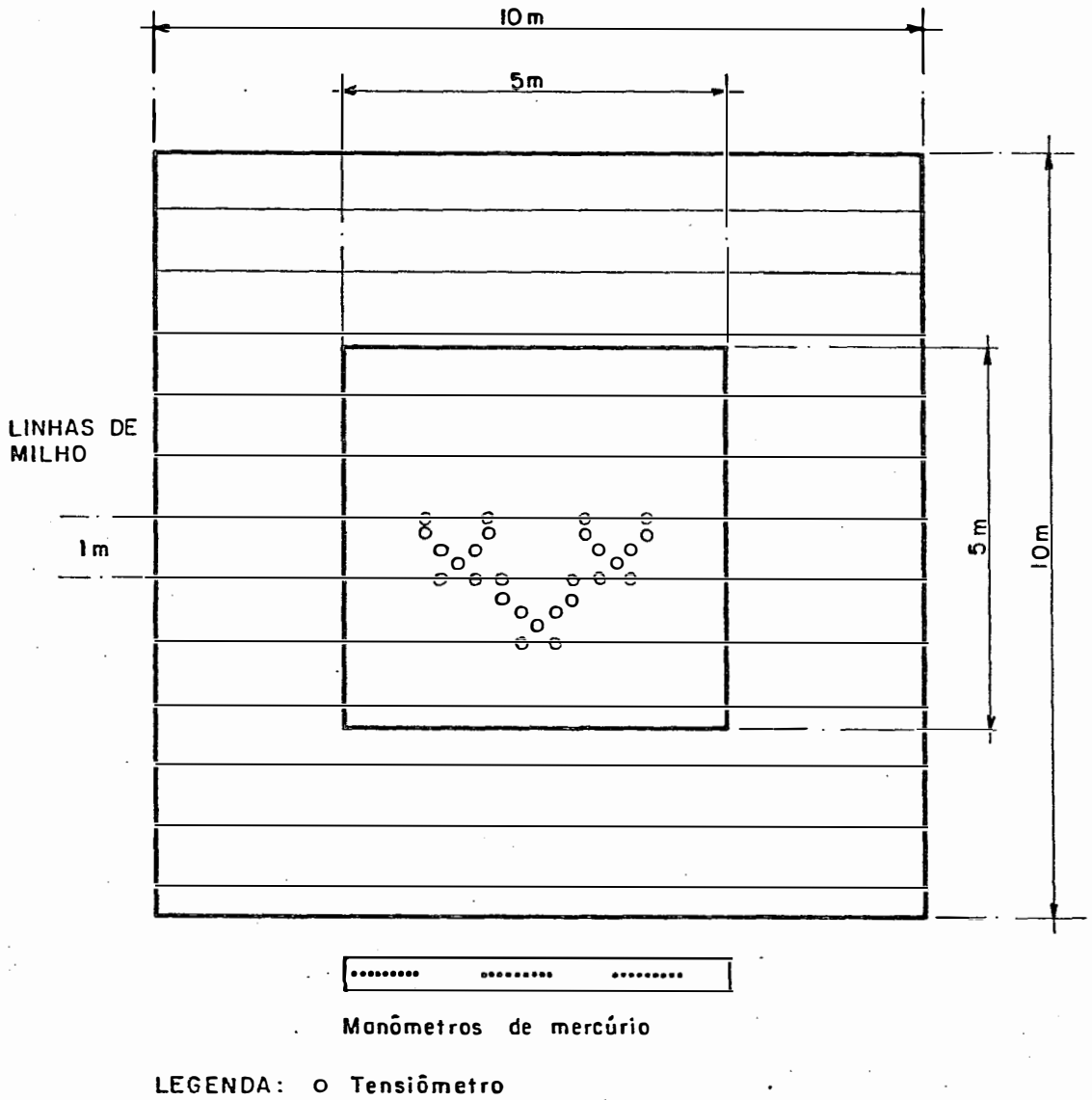


FIGURA 4 - Esquema de distribuição da cultura de milho em relação aos equipamentos na parcela experimental.

cha e cuba plástica para colocação de mercúrio, de acordo com o esquema da Figura 1.

Para a instalação dos tensiômetros, foi utilizado um trado de rosca e um pistão de ferro, de diâmetros semelhantes ao do tubo PVC. Antes da instalação, removeu-se a camada superficial de 20 cm do solo da parcela, a qual foi recolocada no local de origem após a completa instalação dos equipamentos. Os tubos de nylon ficaram a 25 cm da superfície do solo e estendidos até uma borda da parcela para se constituir no manômetro de mercúrio e permitir a fluência do tensiômetro para retirada das bolhas de ar (ver Figura 1). Este tipo de instalação foi idealizado visando evitar problemas de quebra dos tubos e estrago dos fios de nylon, devido ao preparo mecânico e tratos culturais durante o ciclo das culturas, facilidade de leitura dos 27 equipamentos e o menor pisoteio da área plantada, evitando compactação do terreno, devido ao necessário trânsito diário na parcela para as leituras.

3.4.1.2. Conjunto de irrigação - O sistema de irrigação era constituído de uma bomba de 0,5 HP, uma mangueira de PVC flexível e um aspersor tipo chuveiro. Foi efetuada a calibração do equipamento, medindo-se a sua vazão.

#### 3.4.2. Equipamentos do posto agrometeorológico

A contabilização da entrada de água por precipitação e a influência de outros fatores climáticos foi medida nos equipamentos do Posto Agrometeorológico do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP, localizado junto à parcela experimental.

Foram utilizadas as leituras do pluviômetro, pluviôgrafo, termohigrôgrafo, termômetros de bulbo seco e úmido, actinôgrafo, heliôgráfico, tanque Classe A e anemômetros.

### 3.4.3. Equipamentos de laboratório

Para a elaboração das curvas características das diversas camadas do solo, foram utilizados anéis de alumínio de bordos cortantes para obtenção das amostras de solo com estrutura indeformada. Para altas tensões (0,33 - 15 atm), foi utilizado o sistema de Câmaras de Pressão de Richards. Para baixas tensões (< 1 atm), foram utilizados funis de Buchner, descrito em LIBARDI (1984).

Para a secagem das amostras, foram utilizadas latas de alumínio para acondicionamento das amostras e estufas com temperatura constante de 105°C. Outros materiais utilizados foram: balanças de precisão, tolueno, água destilada, fita-crepe, espátulas, folhas de alumínio, sacos de papel, etc.

### 3.5. Culturas

No presente estudo, foi efetuado o balanço hídrico de duas culturas: uma de feijão (Phaseolus vulgaris L.) e outra de milho (Zea mays L.). O intuito de se escolher estas duas culturas foi a diversidade de condições em que foram instaladas (feijão, no inverno; milho, no verão) e seus hábitos radiculares diferentes (feijão: pivotante; milho: fasciculado). O plantio da cultura de

feijão foi feito tão logo terminou a determinação das características de transmissão da água no solo. A cultura utilizada foi o feijoeiro comum, cultivar carioca, a qual é precoce (90-100 dias), geneticamente produtiva, relativamente tolerante às flutuações de temperatura e precipitação e pouco susceptível a algumas moléstias comuns no estado de São Paulo (MIYASAKA et alii, s.d.).

### 3.5.1. Feijão

Para o plantio da cultura de feijão, o solo foi preparado de modo convencional (uma aração e duas gradagens). A seguir, os sulcos foram abertos com 10 m de comprimento por 5 cm de profundidade. O espaçamento utilizado foi de 40 cm entre linhas e 20 cm entre covas. A semeadura foi feita no dia 03/04/1981, colocando-se quatro sementes por cova, previamente tratadas para prevenir o ataque de fungos. Seis dias após, fez-se o desbaste, deixando-se duas plantas por cova, obtendo-se um "stand" de 125000 covas/ha ou 250000 plantas/ha. Com base na análise do solo, aplicaram-se, na semeadura, no fundo do sulco em linha contínua, 150 Kg de  $P_2O_5$ /ha, como superfosfato simples (18%  $P_2O_5$ ; 26% CaO; 21% S), o que resultou numa aplicação efetiva de 150 Kg Ca/ha e 69 Kg S/ha. A adubação nitrogenada constou de 52 Kg N/ha na forma de sulfato de amônio (20% N), fracionados em 1/3 seis dias após a germinação (dag) e 2/3 aos 26 dag. O adubo foi enterrado em sulcos de 5 cm de profundidade, abertos a 10 cm da linha de plantas. Controle entomológico foi efetuado quando apareceram as pragas Diabrótica e Afídeos, nos primeiros 20 dias da cultura. Aplicou-se Folidol em duas ocasiões. Nos primeiros 20 dias, a cultura apresentou deficiência aparente de man-

ganês; foi feita, então, aplicação de adubo foliar de  $MgSO_4 \cdot H_2O$ , a 0,3%, o que foi suficiente para eliminar os sintomas dessa deficiência.

Água suplementar, via irrigação, foi providenciada em seis oportunidades. Aplicaram-se um total de 146,49 mm de água, principalmente no mês de maio, devido à baixa precipitação (44,9 mm), normal neste mês do ano em Piracicaba (SP).

### 3.5.2. Milho

A cultura utilizada foi um cultivar de milho híbrido Cargill-511, de ciclo vegetativo longo ( $\approx$  140 dias), porte baixo e grão dentado. Utilizou-se este híbrido pelo seu bom desenvolvimento, altas respostas à adubação e água (ULLOA et alii, 1982).

Para o plantio da cultura de milho, o terreno foi preparado de modo convencional (uma aração e duas gradagens). Os sulcos foram abertos com 10 m de comprimento por 5 cm de profundidade. O espaçamento utilizado foi de 0,8 m entre-linhas e 25 cm entre covas. A semeadura foi feita no dia 25/11/1981, com três sementes por cova. Germinação de mais de 50% no dia 01/11/81 e desbaste no dia 10/11/81, deixando-se uma planta por cova, obtendo-se um "stand" final de 50000 plantas/ha. A adubação foi feita 10 dias após a germinação (dag), constando de 50 Kg  $P_2O_5$ /ha na forma de superfosfato simples (18%  $P_2O_5$ ; 26% CaO; 21% S) e 10 Kg Mg/ha, na forma de  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ . A adubação nitrogenada constou de 120 Kg N/ha na forma de sulfato de amônio (20% N), fracionada 1/3 aos 10 dag e 2/3, 40 dag. O adubo foi enterrado em sulcos de 5 cm de profundidade, abertos 10 cm ao lado das linhas de plantas. A cultura de

milho não recebeu controle entomológico, pela quase ausência de pragas e nem água suplementar via irrigação, por não ter sido necessário.

Foram plantados os mesmos cultivares de feijão e milho em torno da parcela experimental de 10 x 10 m, de forma que a área cultivada com as culturas era de aproximadamente 900 m<sup>2</sup> (30x30), simulando uma condição de lavoura.

### 3.6. Amostragem e determinação na parcela experimental

#### 3.6.1. Amostragem de plantas

Foram feitas amostragens de plantas de três covas cada vez, em cinco estádios de desenvolvimento da cultura de feijão e sete estádios de desenvolvimento da cultura de milho. As amostras eram feitas ao acaso, dentro da parcela experimental (10 x 10 m), evitando-se a parcela (5 x 5 m) onde estavam os tensiômetros. O material colhido foi levado ao laboratório, lavado em água de torneira, depois com solução de HCl 0,02N e, finalmente, com água destilada duas vezes. A seguir, os tecidos foram colocados em sacos de papel e secados em estufa a 60°C até peso constante (48 horas) para determinação da massa seca em estufa.

#### 3.6.2. Determinação de umidade do solo

A determinação da umidade do solo durante o desenvol-

vimento das duas culturas foi feito indiretamente através dos tensiômetros instalados nas diversas profundidades, conforme citado no item 3.4.1.1. Eram feitas três ou mais leituras por semana dos manômetros de mercúrio instalados em abrigo fora da parcela de 10 x 10 m (Figuras 3 e 4). Quando apareciam bolhas nos manômetros de mercúrio, os tensiômetros eram fluxados sempre com água destilada e fervida, de forma a minimizar erros nas leituras dos equipamentos (SOUZA et alii, 1979).

Para o cálculo da drenagem profunda diária, os dados de tensiometria de campo foram colocados em gráfico e nas datas onde não havia dados, interpolou-se linearmente as leituras, conseguindo-se também eliminar dados distoantes devido a problemas naturais no manuseio dos tensiômetros, como mal vedamento das rolhas, não fluxagem do equipamento e resposta diferencial das cápsulas porosas aos processos de secamento e molhamento do solo (SOUZA et alii, 1979).

### 3.7. Parâmetros avaliados

3.7.1. Componentes do balanço hídrico das culturas de feijão e milho.

3.7.2. Rendimento de matéria seca nas diferentes partes da planta  
das culturas de feijão e milho.

3.7.3. Eficiência de utilização de água (EUA) pelas culturas.



### 3.8. Métodos

Neste item estão descritas a técnica de medida dos tensiômetros, cálculo dos componentes do balanço hídrico e o método de medida da condutividade hidráulica.

#### 3.8.1. Componentes do balanço hídrico

O balanço hídrico foi feito em um volume de solo de área unitária na profundidade  $0 < z < L$ , durante um intervalo de tempo  $t_1 - t_0$ , sendo descrito por:

$$\int_{t_0}^{t_1} (p + i - q_e \pm q_L \pm q_d) dt = \int_0^L \int_{t_0}^t \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) dt dz \quad (1)$$

onde:  $p$  = intensidade de precipitação ( $\text{mm.dia}^{-1}$ )

$i$  = intensidade de irrigação ( $\text{mm.dia}^{-1}$ )

$q_e$  = fluxo de água por evapotranspiração ( $\text{mm.dia}^{-1}$ )

$q_L$  = fluxo de água por drenagem profunda ou ascensão capilar ( $\text{mm.dia}^{-1}$ )

$q_d$  = fluxo de água por deflúvio superficial ( $\text{mm.dia}^{-1}$ )

$\theta$  = umidade volumétrica ( $\text{cm}^3 \text{ água} \cdot \text{cm}^{-3} \text{ solo}$ )

$t$  = tempo (dias)

A expressão acima pode ser desdobrada em uma soma algébrica de integrais, da forma:

$$\int_{t_0}^{t_1} p dt + \int_{t_0}^{t_1} i dt - \int_{t_0}^{t_1} q_e dt \pm \int_{t_0}^{t_1} q_L dt \pm \int_{t_0}^{t_1} q_d dt = \int_0^L \int_{t_0}^{t_1} \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) dt dz \quad (2)$$

ou, separando os termos:

$$\left. \begin{array}{l} \int_{t_0}^{t_1} p dt = + p (t_1 - t_0) = P = \text{precipitação (mm \bar{a}gua)} \\ + \int_{t_0}^{t_1} i dt = + i (t_1 - t_0) = I = \text{irrigação (mm \bar{a}gua)} \\ - \int_{t_0}^{t_1} q_e dt = -q_e (t_1 - t_0) = -ET = \text{evapotranspiração (mm \bar{a}gua)} \\ \pm \int_{t_0}^{t_1} q_L dt = \pm q_L (t_1 - t_0) = \pm Q_L = \text{drenagem profunda ou ascensão capilar (mm \bar{a}gua)} \\ \pm \int_{t_0}^{t_1} q_d dt = \pm q_d (t_1 - t_0) = \pm Q_D = \text{deflúvio superficial (mm \bar{a}gua)} \end{array} \right\}$$

Para medir a precipitação, utilizaram-se pluviômetros, que medem diretamente P, devendo integrar-se as precipitações entre o intervalo de tempo  $(t_1 - t_0)$  considerado. A irrigação foi medida com base na vazão do aspersor, no tempo gasto e na área irrigada. O fluxo de água devido à evaporação de água pela superfície do solo ou por transpiração das plantas foi a incôgnita da equação do balanço. As perdas por escoamento superficial foram desprezadas, pois o terreno era praticamente plano e possuía alta capacidade de infiltração de água (ARAUJO SILVA, 1982). O fluxo  $(q_L)$  de água que drena ou ascende ao volume de solo considerado

foi determinado pela equação de Darcy:

$$q_L = -K(\theta) \frac{\partial \psi_h}{\partial z} \quad (3)$$

onde:  $q_L$  = fluxo de água por drenagem profunda ou ascensão capilar  
(L.T<sup>-1</sup>)

$K(\theta)$  = condutividade hidráulica do solo (L.T<sup>-1</sup>)

$\partial \psi_h / \partial z$  = gradiente de potencial hidráulico na direção vertical (L.L<sup>-1</sup>)

A metodologia de determinação da condutividade hidráulica será melhor enfocada adiante. O gradiente de potencial hidráulico foi obtido através da diferença do potencial hidráulico entre dois pontos, dividido pela distância entre eles. Por exemplo: a medida do fluxo de água ( $q_{120}$ ) na profundidade de 120 cm, seria:

$$q_{120} = -K_{120}(\theta) \frac{(\psi_{h105} - \psi_{h135})}{30} \quad (4)$$

onde:  $q_{120}$  = fluxo de água a 120 cm da superfície do solo (L.T<sup>-1</sup>)

$K_{120}(\theta)$  = condutividade hidráulica a 120 cm de profundidade  
(L.T<sup>-1</sup>)

$\psi_{h105}$  = potencial hidráulico a 105 cm de profundidade (L)

$\psi_{h135}$  = potencial hidráulico a 135 cm de profundidade (L)

Foram feitas leituras, na medida do possível, diárias da altura da coluna de mercúrio dos tensiômetros ( $h_1$ ), que, juntamente com as distâncias da superfície do solo ao nível superior do mercúrio na cuba ( $h_c$ ) e à profundidade média de medida da cápsula ( $z$ ) foram utilizadas na equação:

$$\psi_m = -12,6h_1 + h_c + z \quad (5)$$

para o cálculo do potencial matricial, em cm H<sub>2</sub>O. As leituras fo-

ram em triplicata de cada profundidade, permitindo o estudo das variações das leituras obtidas.

A integral dupla do segundo membro das equações (1) e (2) pode ser entendida como a quantidade de água armazenada no solo até a profundidade  $z=L$ , num período de tempo  $t_0$  a  $t_1$ . Considerando-se um volume de solo até uma profundidade de interesse, a integral dupla pode ser vista da seguinte forma:

$$\int_0^L \int_{t_0}^{t_1} \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) dz = \Delta A \quad (6)$$

Necessita-se, portanto, das variações de umidade com o tempo no período  $t_1 - t_0$  e estas variações devem ser integradas de 0 a L, pois dependem da profundidade z. Para facilidade de cálculo, sem prejuízo dos resultados, utilizou-se a umidade média do perfil ( $\bar{\theta}$  de 0 a L). Nestas condições, se  $\theta = \text{cm}^3 \text{ H}_2\text{O} / \text{cm}^3$  de solo e L (cm),  $\Delta A$  (mm), no período  $t_1 - t_0$ , será obtido pela expressão:

$$\Delta A = 10 (\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_0) \cdot L \quad (7)$$

Os dados de umidade volumétrica ( $\theta$ ) foram obtidos indiretamente, utilizando os tensiômetros instalados na parcela e curvas características  $\log \psi_m$  (potencial matricial) versus  $\theta$ .

3.8.1.1. Métodos de determinação da condutividade hidráulica - De uma forma geral, os métodos para determinação da condutividade hidráulica do solo podem ser classificados, como LIBARDI (1984), em:

1. Métodos de laboratório

1.1. Condições de solo saturado

1.1.1. Permeâmetro de carga constante (KLUTE, 1965a)

1.1.2. Permeâmetro de carga decrescente (KLUTE, 1965a)

1.2. Condições de solo não saturado

1.2.1. Métodos em condições de equilíbrio dinâmico (KLUTE, 1965b)

1.2.2. Métodos em condições de equilíbrio transiente (KLUTE, 1965b)

1.3. Métodos que calculam a condutividade hidráulica a partir de propriedades físicas do solo (CHILDS & COLLIS-GEORGE, 1950; MARSHALL, 1958; LAROUSSE et alii, 1981; RAGAB et alii, 1982; VAN GENUCHTEN, 1980).

2. Métodos de campo

2.1. Medidas abaixo do lençol freático (BOERSMA, 1965)

2.2. Medidas acima do lençol freático

2.2.1. Método de HILLEL et alii (1972)

2.2.2. Método de Hillel analítico (LIBARDI et alii, 1979)

2.2.3. Método da umidade (LIBARDI et alii, 1980)

No presente trabalho, o método utilizado para a determinação da função  $K(\theta)$  foi o método da umidade de LIBARDI et alii

(1980), no qual se assume:

1) gradiente de potencial hidráulico unitário  $\partial\psi/\partial z = 1$

2) condutividade função exponencial da umidade  $K(\theta) = K_0 e^{\gamma(\theta - \theta_0)}$ ,

onde  $\theta_0$  e  $K_0$  são os valores máximos de umidade e condutividade hidráulica, respectivamente.

Nestas circunstâncias, utilizando-se todos os procedimentos experimentais do método do perfil instantâneo (LIBARDI, 1978), a equação de Richards (combinação da equação de Darcy com a equação da continuidade), tendo em vista as condições de contorno:

$$\int_0^z \frac{\partial\theta}{\partial t} dz = K_0 e^{\gamma(\theta - \theta_0)} \quad (8)$$

Para resolver esta integral, toma-se a umidade média ( $\bar{\theta}$ ) até a profundidade  $z$ , de tal maneira que:

$$\frac{\partial\bar{\theta}}{\partial t} z = K_0 e^{\gamma(\bar{\theta} - \theta_0)} \quad (9)$$

Sendo  $a$  uma constante que depende apenas de  $z$ , que ajusta a umidade ( $\theta$ ) à umidade média ( $\bar{\theta}$ ) do solo, temos:

$$a \frac{\partial\theta}{\partial t} z = K_0 e^{\gamma(\theta - \theta_0)} \quad (10)$$

Para uma determinada profundidade  $z$ , separando as variáveis e integrando-se, obtêm-se:

$$\theta = \theta_0 - \frac{1}{\gamma} \ln \left( 1 + \frac{\gamma K_0}{az} \cdot t \right) \quad (11)$$

que é a equação de  $\theta$  em função do tempo.

Em termos de umidade média até a profundidade  $z$ , a equação (11) se torna:

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_0 - \frac{1}{\gamma} \ln \left( 1 + \frac{\bar{\gamma}K_0}{z} \cdot t \right) \quad (12)$$

Da comparação entre as equações (11) e (12), depreende-se que:

$$\alpha = \frac{\gamma}{\bar{\gamma}} \quad (13)$$

Para tempos longos e tendo-se em conta a equação (13), a equação (11) se reduz a:

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

que indica que  $(\theta_0 - \theta)$  é função linear de  $\ln t$ . O coeficiente angular é o inverso de  $\gamma$  e o linear uma medida de  $K_0$ , contanto que  $\bar{\gamma}$  seja conhecido.

Igualmente, para tempos longos, a equação (12) fica:

$$\bar{\theta}_0 - \bar{\theta} = \frac{1}{\bar{\gamma}} \ln t + \frac{1}{\bar{\gamma}} \ln t \left( \frac{\bar{\gamma}K_0}{z} \right) \quad (15)$$

a partir da qual se pode calcular  $\bar{\gamma}$ .

De posse dos valores de  $\gamma$ ,  $\theta_0$  e  $K_0$ , chega-se à equação da condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica:

$$k(\theta) = K_0 e^{\gamma(\theta - \theta_0)} \quad (16)$$

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

##### 4.1. Curva de retenção de água do solo

Um dos parâmetros básicos para o estudo da dinâmica da água nas culturas agrícolas, no presente trabalho, foi a determinação da curva de retenção de água para as diversas camadas da Terra Roxa Estruturada.

Os pontos da curva foram determinados em Funil de Buchner (LIBARDI, 1984) para as tensões de  $1 \cdot 10^{-4}$ ,  $1 \cdot 10^{-3}$ ,  $3 \cdot 10^{-3}$ ,  $5 \cdot 10^{-3}$ ,  $7 \cdot 10^{-3}$ ,  $9 \cdot 10^{-3}$ ,  $1,5 \cdot 10^{-3}$  MPa, abrangendo assim, de maneira detalhada, a faixa de umidade próxima à saturação, e na Câmara de Pressão de Richards, para as tensões de  $3,3 \cdot 10^{-2}$ ,  $1 \cdot 10^{-1}$ ,  $5 \cdot 10^{-1}$  e 1,5 MPa. Os valores médios (desvio padrão) encontram-se na Tabela 3. Os valores médios foram desenhados nas Figuras 5 a 9.

Como se pode observar, é grande a variação de umidade nas diversas tensões próximas à saturação, alcançando valores semelhantes somente na pressão de 1,5 MPa. Isto é devido às características morfológicas deste solo. Na camada de 15 cm, a umidade inicial mais baixa é devida a problemas de compactação natural do terreno, perda da estrutura natural, perda de material coloidal devido à erosão laminar com o uso intensivo da área. Isto também acarreta um menor conteúdo de argila e conseqüente menor umidade na tensão de 15 atm (GARDNER, 1983). Na camada abaixo de 15 cm de pro-



fundidade até aproximadamente 60 cm é o horizonte B-textural com estrutura em blocos sub-angulares desenvolvido com concentração de microporos, onde é necessário maior gasto de energia nas faixas de umidade próximas à saturação. A forma das curvas aproximam-se da forma tradicional de um "S" esticado que indica perda lenta de água, quando passamos de uma tensão a outra. A umidade volumétrica determinada na tensão de  $1 \cdot 10^{-4}$  MPa é praticamente igual à porosidade total ( $\alpha\%$ ) (Tabela 1). Ao contrário, abaixo de 60 cm, a umidade volumétrica determinada na tensão de  $1 \cdot 10^{-4}$  MPa foi de  $1,4 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  menor que a porosidade total, evidenciando perda de água, mesmo em tensões tão próximas à saturação.

Ao contrário do horizonte B-textural, o horizonte B-óxico tem uma estrutura aparentemente maciça, mas é granular muito forte, desenvolvida em microagregados pequenos (menores que 3 mm), que produzem uma distribuição de poros mais estreita que a do horizonte B-textural.

Isto pode ser confirmado tanto pela Tabela 3 como pelas Figuras 7, 8 e 9. Na Tabela 3 pode-se observar que as mudanças de umidade volumétrica nas tensões próximas à saturação ( $1 \cdot 10^{-4}$  -  $3,3 \cdot 10^{-2}$  MPa) das camadas de 75 - 150 cm são de maior amplitude que as dos horizontes superficiais que reflete em curvas de retenção (Figuras 7, 8 e 9) em uma forma de "S" mais pronunciado ou "achatado". Estas características das curvas de retenção implicam em diferentes comportamentos quanto à função condutividade hidráulica, que será discutida adiante. As diferenças nas características de retenção dos diversos horizontes podem ser melhor observadas tomando-se como referência a tensão de  $1,5 \cdot 10^{-2}$ ; nota-se que a diferença de umidade volumétrica ( $\theta\%$ ) máxima é de 8,11% entre a camada de 45 e 120 cm.

TABELA 3 - Unidade volumétrica ( $\Theta = \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) e tensão correspondente (MPa) da Terra Roxa Estruturada, nas diversas profundidades. Valores são médias de quatro repetições (desvio padrão).

| Prof.<br>(cm) | Tensão (MPa)    |                 |                   |                   |                   |                   |                     |                     |                   |                   |                 |
|---------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
|               | $10^{-4}$       | $10^{-3}$       | $3 \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-3}$ | $7 \cdot 10^{-3}$ | $9 \cdot 10^{-3}$ | $1,5 \cdot 10^{-2}$ | $3,3 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^{-1}$ | $5 \cdot 10^{-1}$ | 1,5             |
| 15            | 48,63<br>(1,82) | 43,19<br>(0,89) | 39,63<br>(1,13)   | 38,08<br>(1,25)   | 37,36<br>(1,21)   | 34,45<br>(0,28)   | 33,72<br>(0,50)     | 32,08<br>(0,60)     | 30,90<br>(0,73)   | 28,12<br>(0,64)   | 26,91<br>(0,19) |
| 30            | 53,00<br>(1,00) | 49,99<br>(1,00) | 48,49<br>(1,00)   | 46,31<br>(1,18)   | 44,70<br>(1,20)   | 44,08<br>(1,20)   | 42,55<br>(1,10)     | 35,88<br>(1,11)     | 34,79<br>(1,96)   | 31,85<br>(0,87)   | 29,90<br>(1,17) |
| 45            | 52,20<br>(1,40) | 50,58<br>(2,40) | 48,62<br>(2,03)   | 46,95<br>(1,86)   | 45,20<br>(1,96)   | 44,62<br>(1,92)   | 42,84<br>(1,83)     | 36,98<br>(0,97)     | 35,27<br>(0,92)   | 31,42<br>(1,05)   | 29,04<br>(0,96) |
| 60            | 51,45<br>(1,08) | 48,23<br>(0,32) | 45,34<br>(0,25)   | 43,56<br>(0,53)   | 42,56<br>(0,50)   | 40,16<br>(0,51)   | 38,85<br>(0,45)     | 37,14<br>(0,85)     | 35,13<br>(0,92)   | 32,05<br>(0,93)   | 29,81<br>(1,13) |
| 75            | 50,23<br>(2,95) | 49,22<br>(4,17) | 44,90<br>(4,57)   | 40,74<br>(4,83)   | 39,25<br>(4,53)   | 37,83<br>(4,57)   | 35,83<br>(4,77)     | 33,86<br>(2,31)     | 31,58<br>(0,62)   | 29,20<br>(0,67)   | 28,28<br>(0,85) |
| 90            | 53,51<br>(2,01) | 52,85<br>(2,04) | 50,18<br>(2,42)   | 43,66<br>(1,19)   | 41,48<br>(0,84)   | 39,47<br>(0,81)   | 35,82<br>(0,64)     | 32,35<br>(1,31)     | 29,10<br>(1,47)   | 27,66<br>(2,06)   | 26,28<br>(1,21) |
| 105           | 53,56<br>(1,25) | 52,41<br>(1,47) | 46,41<br>(1,53)   | 41,10<br>(1,40)   | 38,55<br>(1,28)   | 36,51<br>(1,05)   | 33,25<br>(0,59)     | 30,72<br>(0,78)     | 28,26<br>(0,49)   | 26,45<br>(0,64)   | 25,70<br>(0,77) |
| 120           | 53,15<br>(0,72) | 52,64<br>(0,46) | 46,94<br>(1,00)   | 41,60<br>(1,29)   | 38,98<br>(1,17)   | 36,88<br>(1,04)   | 33,84<br>(0,77)     | 30,62<br>(0,73)     | 28,42<br>(0,59)   | 26,48<br>(0,65)   | 23,78<br>(0,57) |
| 135           | 55,10<br>(2,18) | 52,92<br>(2,52) | 48,63<br>(2,73)   | 44,82<br>(2,78)   | 41,60<br>(2,64)   | 39,56<br>(2,65)   | 36,08<br>(2,39)     | 31,63<br>(1,19)     | 27,52<br>(0,90)   | 25,21<br>(0,67)   | 24,61<br>(0,97) |
| 150           | 55,81<br>(2,98) | 53,31<br>(1,72) | 47,19<br>(0,64)   | 43,18<br>(1,11)   | 39,91<br>(1,16)   | 37,62<br>(1,51)   | 34,69<br>(1,70)     | 30,48<br>(1,20)     | 26,84<br>(0,56)   | 25,84<br>(0,23)   | 24,13<br>(0,59) |

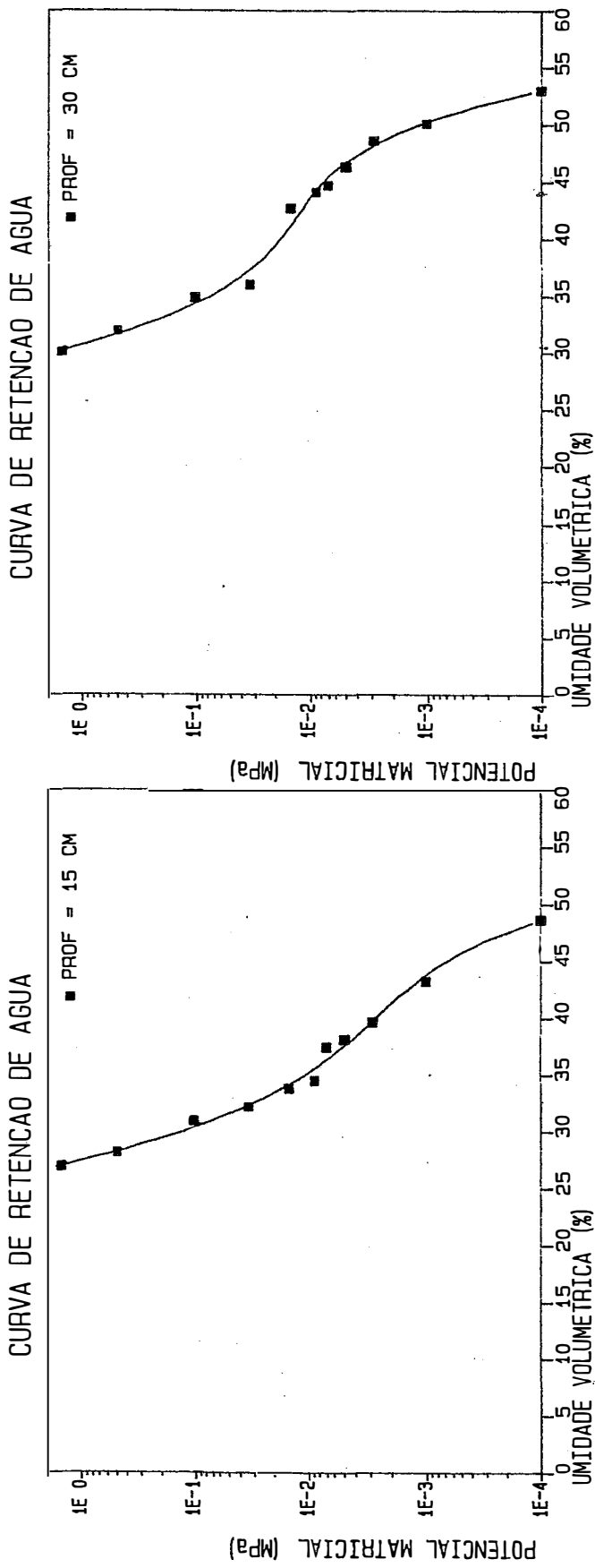


FIGURA 5 - Curvas de retenção de água da Terra Roxa Estruturada nas profundidades de 15 e 30 cm.

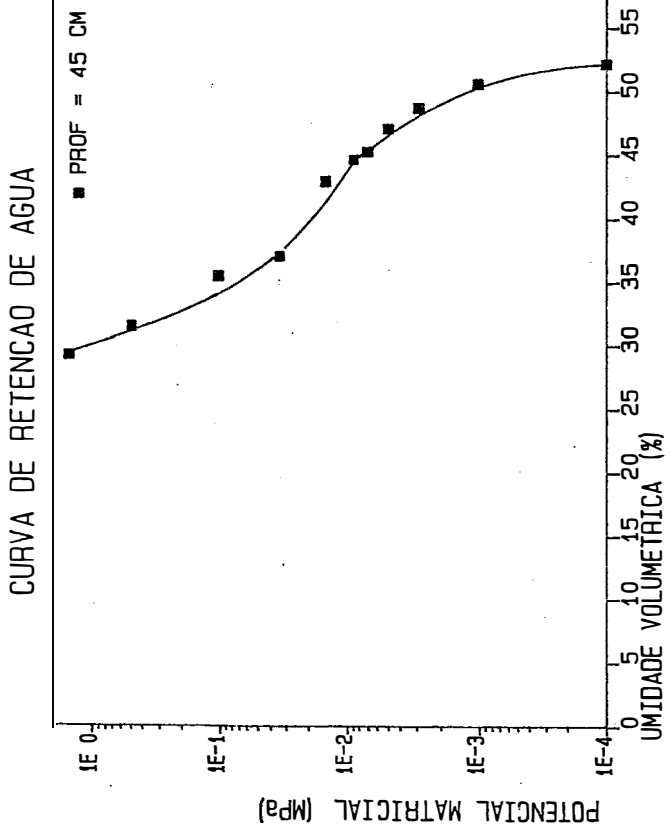
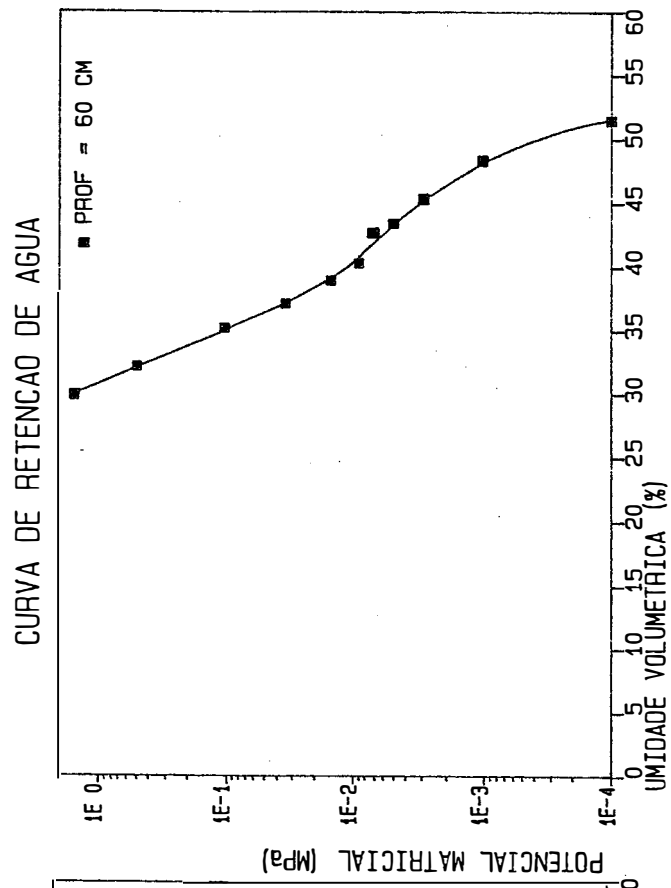


FIGURA 6 -- Curva de retenção de água da Terra Roxa Estruturada nas profundidades de 45 e 60 cm.

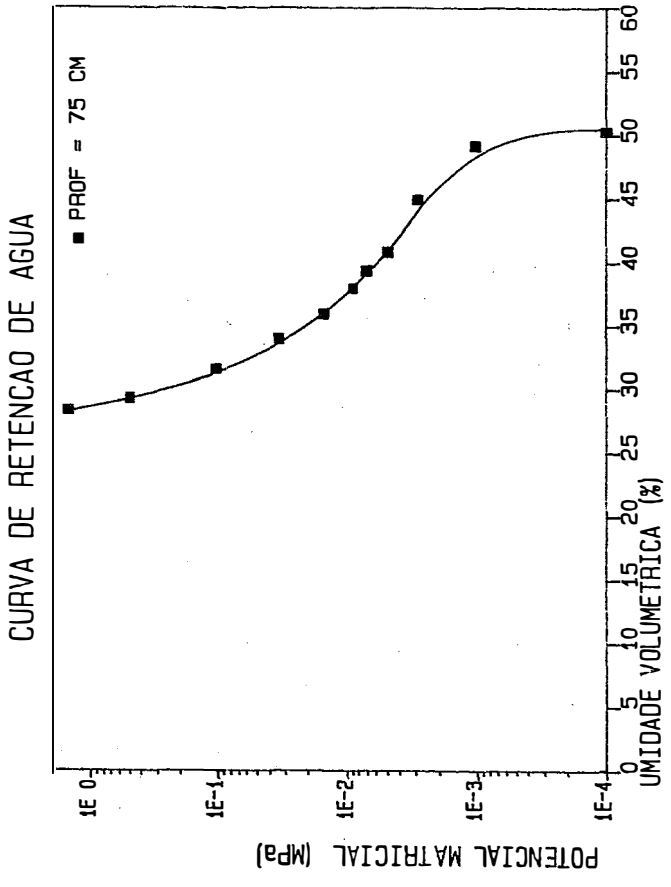
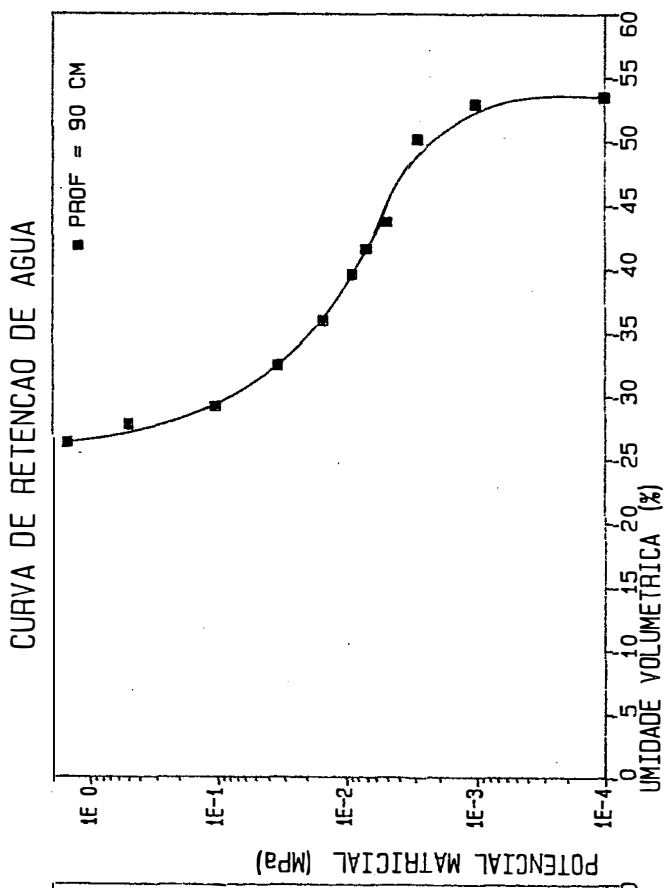


FIGURA 7 - Curva de retenção de água da Terra Roxa Estruturada nas profundidades de 75 e 90 cm.

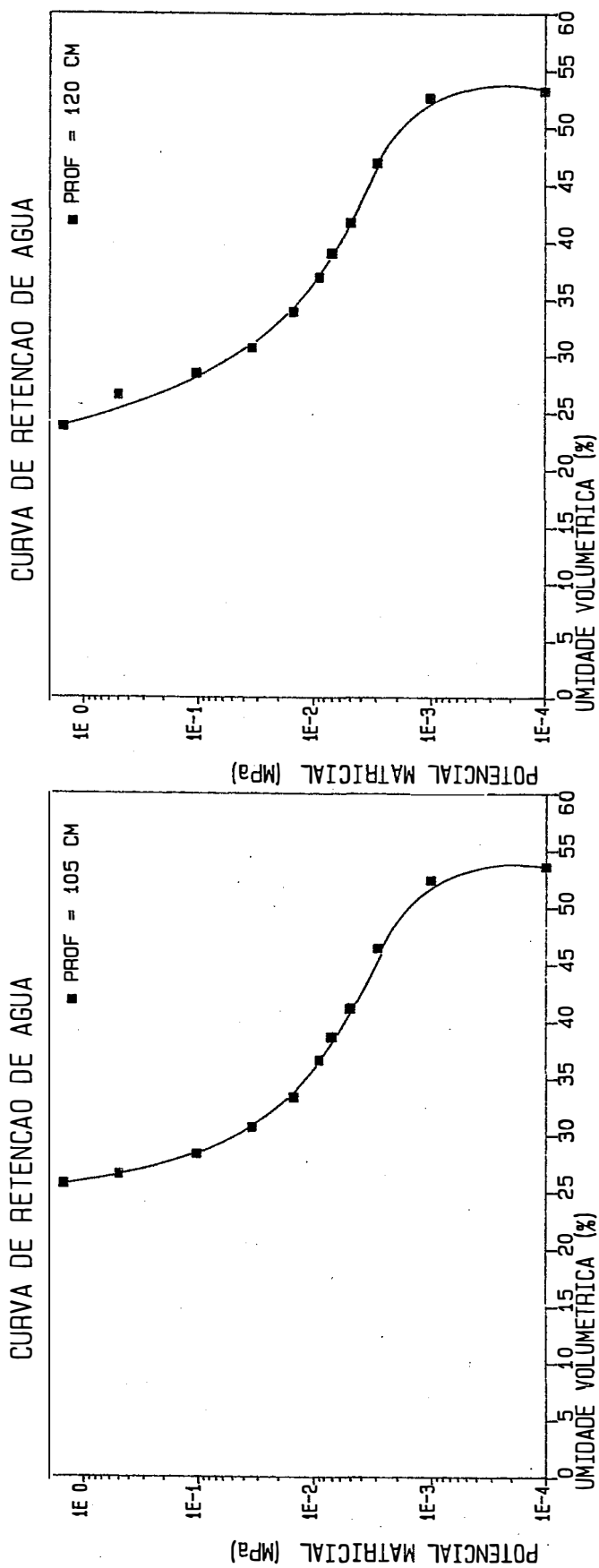


FIGURA 8 - Curva de retenção de água da Terra Roxa Estruturada nas profundidades de 105 e 120 cm.

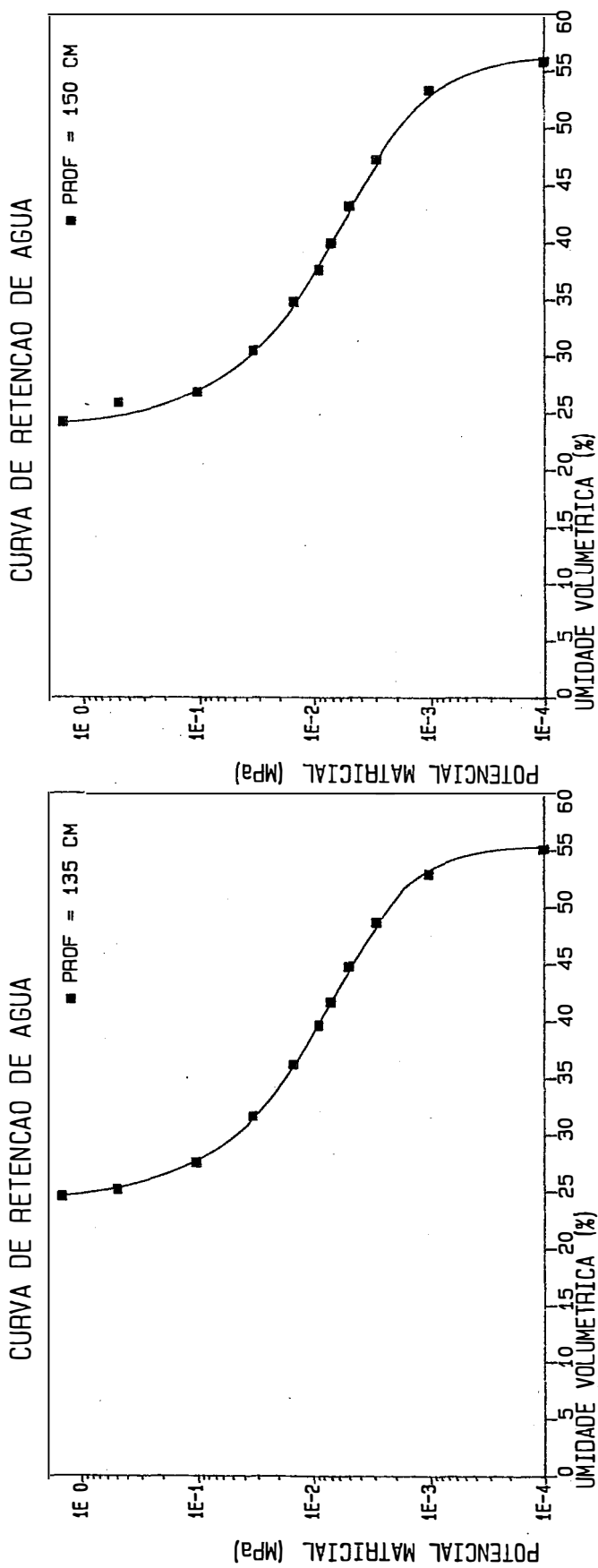


FIGURA 9 - Curva de retenção de água da Terra Roxa Estruturada nas profundidades de 135 e 150 cm.

A partir dos dados da curva de retenção, buscou-se na literatura uma equação que melhor ajustasse os dados de potencial matricial e umidade volumétrica.

Equações como a de DE JONG (1967), DE JONG et alii (1983), CLAPP & HORNBERGER (1982) foram testadas, mas por serem curvas de regressão exponencial ou necessitarem de duas equações para a curva de retenção completa e, principalmente, por não se ajustarem aos dados de umidade do solo nas faixas próximas à saturação, não foram utilizadas neste trabalho.

A partir de uma revisão da literatura, optou-se pela equação descrita por VAN GENUCHTEN (1978). É uma equação não linear que utiliza dois parâmetros extremos da curva de retenção,  $\theta_r$  e  $\theta_s$ , a umidade volumétrica equivalente a uma tensão de 1,5 MPa e a de saturação, e três outros parâmetros, respectivamente,  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$ , calculados através de modelo gráfico descrito em VAN GENUCHTEN (1980) ou através de um modelo de otimização de funções não lineares pelo método dos mínimos quadrados. O programa em linguagem Fortran IV está descrito em VAN GENUCHTEN (1978). A partir deste modelo de equação de curva de retenção, VAN GENUCHTEN (1978, 1980, 1985) obteve equações da condutividade hidráulica em condições não saturadas, baseando-se nos modelos de  $K(\theta)$  descritos em MUALEM (1976), BURDINE (1953) e BROOKS & COREY (1966). Em VAN GENUCHTEN & NIELSEN (1985), há uma discussão sobre cada método de determinação da função  $K(\theta)$ . A não utilização da função  $K(\theta)$  descrita em VAN GENUCHTEN (1980) é devida ao fato de se necessitar de condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ) para a obtenção da condutividade hidráulica do solo ( $K$ ), pois, segundo o modelo:  $K_r = K/K_0$ , onde  $K_r$  é a condutividade relativa, obtida nos vá-



rios modelos da função  $K(\theta)$  enumerados acima (VAUCLIN et alii, 1982; INOUE et alii, 1984; DANE, 1980).

Problemas com secamento superficial das amostras de solo com estrutura deformada e principalmente indeformada, número de amostras necessárias para a determinação da condutividade hidráulica em solo saturado e a distribuição log-normal (NIELSEN et alii, 1963) dos resultados são alguns a serem resolvidos quando da determinação deste parâmetro.

A técnica de otimização de funções não lineares pelo método dos quadrados mínimos, exige que seja dado um valor inicial aos parâmetros para o ajuste final dos coeficientes ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$ ) aos dados da equação. Diferentes valores iniciais e o número de interações leva à obtenção de diferentes valores finais destes parâmetros que influenciarão na obtenção das relações  $\psi_m(\theta)$ ,  $K(\theta)$  ou  $K(\psi_m)$ . Isto é particularmente verdadeiro quando se tem poucos pontos determinados em laboratório ou a campo da curva de retenção. No caso de poucos valores próximos à umidade de saturação, há uma superestimativa destes valores; ou quando não se tem pontos de umidade nas tensões mais altas (próximas a 1,5 MPa), há uma subestimativa da umidade volumétrica residual ( $\theta_r$ ) (VAN GENUCHTEN, 1980, 1985).

No caso presente, os dados das curvas, como pode ser visto na Tabela 3, foram em grande número e, a partir de um programa de computador, foram calculados os diversos valores das cinco variáveis do modelo descrito por VAN GENUCHTEN (1980) para a curva de retenção (Tabela 4). A perfeição de ajuste da curva de retenção pelo modelo de VAN GENUCHTEN (1980) aos dados experimentais, pode ser observada confrontando-se a Tabela 3 com a Tabela 5 e observan-

do-se os valores do coeficiente de correlação ( $r$ ), sempre superiores a 0,98.

Na Tabela 5 estão os valores calculados de umidade volumétrica ( $\theta$ ) em função de diversas tensões (MPa) para as diversas profundidades a partir dos coeficientes  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  da Tabela 4. A grande maioria dos dados da Tabela 5, se não tem o mesmo valor dos dados da Tabela 3, estão dentro do desvio padrão. Pode-se concluir, então, da grande utilidade da equação de VAN GENUCHTEN (1980) na descrição da curva de retenção nas presentes condições e, segundo a literatura, há um caráter de universalidade de aplicação a outros tipos de solos (VAN GENUCHTEN e NIELSEN, 1985; VAUCLIN et alii, 1982; INOUE et alii, 1984; DANE, 1980).

TABELA 4 - Coeficientes da equação  $\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n)^m}$  (VAN GE-  
NUCHTEN (1978), para as  
diversas profundidades da Terra Roxa Estruturada.

| Prof.<br>(cm) | $\alpha$ | n        | m       | $\frac{\theta_s}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}}$ | $\frac{\theta_r}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}}$ | r       |
|---------------|----------|----------|---------|---|---|---------|
| 15            | 0,15966  | 0,97368  | 0,31051 | 0,4978  | 0,2477  | 0,99169 |
| 30            | 0,00972  | 0,88802  | 0,78780 | 0,5289  | 0,2976  | 0,98748 |
| 45            | 0,02170  | 1,19571  | 0,30470 | 0,5207  | 0,2630  | 0,99311 |
| 60            | 0,11044  | 1,30998  | 0,16017 | 0,5163  | 0,2447  | 0,99405 |
| 75            | 0,06380  | 3,26347  | 0,13045 | 0,5008  | 0,2729  | 0,99818 |
| 90            | 0,04165  | 16,61572 | 0,03235 | 0,5318  | 0,2565  | 0,99892 |
| 105           | 0,04859  | 2,80284  | 0,22181 | 0,5340  | 0,2549  | 0,99946 |
| 120           | 0,05363  | 15,17785 | 0,03261 | 0,5290  | 0,2375  | 0,99751 |
| 135           | 0,02623  | 1,44335  | 0,45042 | 0,5505  | 0,2393  | 0,99966 |
| 150           | 0,03595  | 1,52739  | 0,42266 | 0,5585  | 0,2403  | 0,99906 |

TABELA 5 - Umidade volumétrica ( $\theta = \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) e tensão (MPa) das diversas profundidades da Terra Roxa Estruturada, calculadas a partir dos dados da Tabela 3, segundo VAN GENUCHTEN (1978).

| Prof.<br>(cm) | (MPa)             |                   |                   |                   |                   |                   |                     |                     |                   |                   |       |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------|
|               | $1 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-3}$ | $7 \cdot 10^{-3}$ | $9 \cdot 10^{-3}$ | $1,5 \cdot 10^{-2}$ | $3,3 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^{-1}$ | $5 \cdot 10^{-1}$ | $1,5$ |
| 15            | 48,61             | 43,41             | 39,42             | 37,61             | 36,49             | 35,70             | 34,21               | 32,26               | 30,15             | 28,08             | 27,15 |
| 30            | 52,60             | 50,82             | 48,18             | 46,33             | 44,91             | 43,78             | 41,37               | 37,81               | 34,03             | 31,25             | 30,46 |
| 45            | 51,99             | 50,92             | 48,64             | 46,85             | 45,45             | 44,33             | 41,99               | 38,54               | 34,63             | 30,97             | 29,43 |
| 60            | 51,39             | 48,52             | 44,96             | 43,14             | 41,97             | 41,12             | 39,48               | 37,22               | 34,59             | 31,69             | 30,20 |
| 75            | 50,08             | 49,47             | 44,32             | 41,16             | 39,33             | 38,11             | 36,00               | 33,52               | 31,18             | 29,25             | 28,52 |
| 90            | 53,18             | 53,18             | 50,05             | 44,21             | 41,14             | 39,18             | 35,93               | 32,38               | 29,36             | 27,21             | 26,52 |
| 105           | 53,40             | 52,64             | 46,16             | 41,28             | 38,44             | 36,60             | 33,60               | 30,46               | 27,99             | 26,41             | 25,95 |
| 120           | 52,90             | 52,90             | 46,79             | 41,64             | 38,90             | 37,12             | 34,14               | 30,78               | 27,81             | 25,58             | 24,81 |
| 135           | 54,98             | 53,21             | 48,39             | 44,61             | 41,85             | 39,81             | 35,98               | 31,43               | 27,64             | 25,24             | 24,57 |
| 150           | 55,77             | 53,39             | 47,18             | 42,89             | 40,02             | 38,00             | 34,42               | 30,41               | 27,18             | 25,14             | 24,58 |

#### 4.2. Condutividade hidráulica em solo não saturado - $K(\theta)$

##### 4.2.1. Redistribuição da água no solo

O método de LIBARDI et alii (1980) assume que a condutividade hidráulica é uma função exponencial da umidade volumétrica da forma

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

onde  $K_0$  e  $\theta_0$  são valores de umidade e condutividade em condições de equilíbrio dinâmico, e  $\gamma$  é uma constante, obtida a partir dos dados experimentais (NIELSEN et alii, 1973; WARRICK et alii, 1977; REICHARDT et alii, 1974; HILLEL, 1972, e outros), e que o gradiente de potencial hidráulico é unitário (BLACK et alii, 1965; DAVIDSON et alii, 1969).

O método de determinação a campo utilizado é o método do perfil instantâneo (RICHARDS et alii, 1956; KLUTE, 1972), com prevenção da evaporação da superfície com uma capa plástica, segundo a modificação introduzida por OGATA e RICHARDS (1957). Uma área de 5 x 5 m foi isolada com folha de flandres e o solo foi saturado até a profundidade de 150 cm, isto é, até que as leituras nos tensiômetros se mantivessem constantes, após o que, aplicaram-se as condições de contorno do método.

A umidade volumétrica ( $\theta$ ) em função do tempo de redistribuição ( $t$  = horas) está descrita na Tabela 6 e desenhada nas Figuras 10, 11 e 12 por repetição e respectivas profundidades. Pode-se observar uma variação nos dados de umidade volumétrica "saturada" ou em condições de equilíbrio dinâmico. Isto pode ser devido às características morfológicas do perfil, discutidas anterior-

mente, variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo (NIELSEN et alii, 1973; WARRICK et alii, 1977; REICHARDT et alii, 1976); problemas com os tensiômetros (SOUZA et alii, 1979), ou com o método do perfil instantâneo (BAKER et alii, 1974). A variabilidade da condutividade hidráulica é a resultante da redistribuição da água no perfil do solo; problemas com os tensiômetros foram minimizados ao máximo, mantendo-os livres de bolhas e a leitura da coluna de mercúrio sendo feita pelo mesmo operador (SOUZA et alii, 1979); o que realmente pareceu ocorrer foi a dificuldade de alcançar uma saturação uniforme do perfil do solo, devido às suas características morfológicas e físicas serem bastante diferentes. No tempo  $t=0$  de redistribuição, o potencial matricial ( $\psi_m = \text{cm } \tilde{\text{água}}$ ) foi diferente para as diferentes repetições e profundidades, variando entre 10 e 50 cm de água, o que subestima os valores de condutividade hidráulica para estas tensões (BAKER et alii, 1974) e constitui uma "limitação" ao uso deste método em condições de campo.

SAUNDERS (1978), no mesmo solo e utilizando o mesmo procedimento experimental, obteve, em condições de equilíbrio dinâmico, potenciais matriciais ( $\psi_m$ ) de 143 e 200 cm de água, nas profundidades de 105 e 135 cm, respectivamente.

Numa análise das curvas de redistribuição do conteúdo de água ( $\theta = \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) em função do tempo, pode-se observar comportamentos distintos entre os vários horizontes do solo (Tabela 6, Figuras 10, 11 e 12). As camadas de 30 e 45 cm possuem redistribuição semelhante; a camada de 60 cm intermediária e as camadas de 75, 90, 105, 120 e 135 cm formam outro bloco. Isto vem confirmar as discussões anteriores sobre as diferentes características morfológicas e físicas do solo (horizontes morfológicos, porosidade total,

curva de retenção). As camadas iniciais devido a problemas de compactação (0 - 30 cm) e adensamento natural (30 - 45 cm), perdem água mais lentamente que as demais (a de 45 - 60 cm, expressão máxima do horizonte B-textural, e as camadas 75-90-105-120-135 cm, expressão máxima do horizonte B-óxico).

A porosidade total ( $\alpha = \%$  - desvio padrão) passa de um valor de 48,10 (2,43) a 0-45 cm para 50,73 a 60 cm e 55,88 (1,03) nas camadas mais profundas. A umidade de saturação no tempo  $t = 0$  horas ( $\theta$ , % - desvio padrão) de 49,94 (0,47) nas camadas de 30 e 45 cm, para 47,46 (2,37) na camada de 60 cm e 43,83 (2,35) nas camadas de 75, 90, 105, 120 cm. A umidade volumétrica ( $\theta$ , % - desvio padrão) final no tempo  $t = 518$  horas foi de 44,40 (0,30) na camada de 30 e 45 cm, de 40,62 (0,41) na camada de 60 cm e 34,08 (1,18) nas camadas de 75, 90, 105, 120 e 135 cm.

A camada de 135 cm atingiu uma umidade volumétrica superior (48,56(0,72)) do que as de 75, 90, 105 e 120 cm e deve ser devido a características de adensamento natural abaixo desta camada que propicia um maior armazenamento de água neste camada (BAKER et alii, 1974).

As diferenças de comportamento na redistribuição de água nas diversas profundidades, apesar de em termos de umidade volumétrica estar em torno de 6% no tempo  $t = 0$  hora e 10% no tempo  $t = 518$  horas, afetarão drasticamente a função condutividade hidráulica, discutida adiante.

TABELA 6 - Conteúdo de água do solo ( $\theta$ ,  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) durante o tempo de redistribuição no perfil da Terra Roxa Estruturada.

| Tempo<br>(horas) | Prof. z = 30 cm |       |       | Prof. z = 45 cm |       |       |
|------------------|-----------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
|                  | Rep.1           | Rep.2 | Rep.3 | Rep.1           | Rep.2 | Rep.3 |
| 0                | 49,16           | 49,82 | 49,82 | 50,13           | 50,13 | 50,58 |
| 17               | 47,15           | 47,28 | 47,24 | 48,22           | 47,86 | 48,10 |
| 35               | 46,78           | 46,90 | 46,82 | 47,63           | 47,18 | 47,51 |
| 42               | 46,43           | 46,54 | 46,51 | 47,29           | 46,97 | 47,40 |
| 83               | 46,10           | 46,43 | 46,21 | 46,89           | 46,67 | 46,97 |
| 154              | 45,58           | 45,88 | 45,75 | 46,20           | 46,11 | 46,57 |
| 250              | 45,11           | 45,29 | 45,17 | 45,76           | 45,67 | 46,11 |
| 353              | 44,59           | 44,67 | 44,61 | 44,97           | 44,97 | 45,51 |
| 443              | 44,27           | 44,34 | 44,29 | 44,75           | 44,62 | 45,19 |
| 518              | 44,11           | 44,19 | 44,11 | 44,41           | 44,55 | 44,90 |

| Tempo<br>(horas) | Prof. z = 60 cm |       |       | Prof. z = 75 cm |       |       |
|------------------|-----------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
|                  | Rep.1           | Rep.2 | Rep.3 | Rep.1           | Rep.2 | Rep.3 |
| 0                | 45,46           | 50,08 | 46,85 | 42,43           | 44,21 | 42,73 |
| 17               | 42,90           | 43,53 | 42,98 | 38,49           | 38,07 | 38,43 |
| 35               | 42,74           | 43,34 | 42,58 | 38,13           | 37,69 | 38,05 |
| 42               | 42,58           | 42,98 | 42,44 | 37,87           | 37,30 | 37,77 |
| 83               | 42,44           | 42,98 | 41,91 | 37,41           | 36,99 | 37,31 |
| 154              | 41,94           | 42,58 | 41,46 | 36,95           | 36,59 | 36,85 |
| 250              | 41,51           | 42,03 | 41,02 | 36,50           | 36,15 | 36,41 |
| 353              | 40,98           | 41,31 | 40,52 | 36,01           | 35,65 | 35,92 |
| 443              | 40,85           | 41,26 | 40,41 | 35,88           | 35,59 | 35,82 |
| 518              | 40,64           | 41,02 | 40,20 | 35,68           | 35,42 | 35,65 |

(continua)



TABELA 6 - Conteúdo de água do solo ( $\theta$ ,  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) durante o tempo de redistribuição no perfil da Terra Roxa Estruturada.

| Tempo<br>(horas) | Prof. z = 90 cm |       |       | Prof. z = 105 cm |       |       |
|------------------|-----------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
|                  | Rep.1           | Rep.2 | Rep.3 | Rep.1            | Rep.2 | Rep.3 |
| 0                | 44,02           | 47,27 | 48,35 | 40,67            | 45,29 | 42,03 |
| 17               | 39,02           | 39,68 | 38,81 | 36,53            | 36,62 | 36,50 |
| 35               | 38,33           | 38,92 | 38,06 | 35,93            | 35,85 | 35,83 |
| 42               | 37,80           | 38,42 | 37,72 | 35,47            | 35,40 | 35,35 |
| 83               | 37,25           | 37,64 | 37,10 | 34,80            | 34,74 | 34,76 |
| 154              | 36,42           | 36,88 | 36,30 | 34,12            | 34,07 | 34,08 |
| 250              | 35,62           | 36,18 | 35,67 | 33,54            | 33,49 | 33,46 |
| 353              | 35,04           | 35,47 | 35,22 | 32,92            | 32,92 | 32,95 |
| 443              | 34,86           | 35,32 | 34,82 | 32,78            | 32,81 | 32,75 |
| 518              | 34,54           | 34,99 | 34,66 | 32,71            | 32,57 | 32,61 |

| Tempo<br>(horas) | Prof. z = 120 cm |       |       | Prof. z = 135 cm |       |       |
|------------------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
|                  | Rep.1            | Rep.2 | Rep.3 | Rep.1            | Rep.2 | Rep.3 |
| 0                | 40,99            | 43,07 | 44,89 | 49,25            | 47,82 | 48,66 |
| 17               | 36,30            | 36,77 | 36,74 | 39,22            | 39,22 | 38,72 |
| 35               | 36,41            | 36,36 | 36,06 | 38,44            | 38,42 | 38,01 |
| 42               | 35,91            | 35,76 | 35,47 | 37,84            | 37,84 | 37,44 |
| 83               | 35,27            | 35,18 | 34,95 | 37,08            | 37,08 | 36,80 |
| 154              | 34,59            | 34,53 | 34,32 | 36,35            | 36,39 | 36,17 |
| 250              | 34,06            | 33,95 | 33,78 | 35,72            | 35,72 | 35,45 |
| 353              | 33,30            | 33,23 | 33,07 | 34,97            | 34,96 | 34,70 |
| 443              | 33,22            | 33,14 | 32,96 | 34,84            | 34,84 | 34,66 |
| 518              | 32,96            | 32,91 | 32,78 | 34,58            | 34,62 | 34,49 |

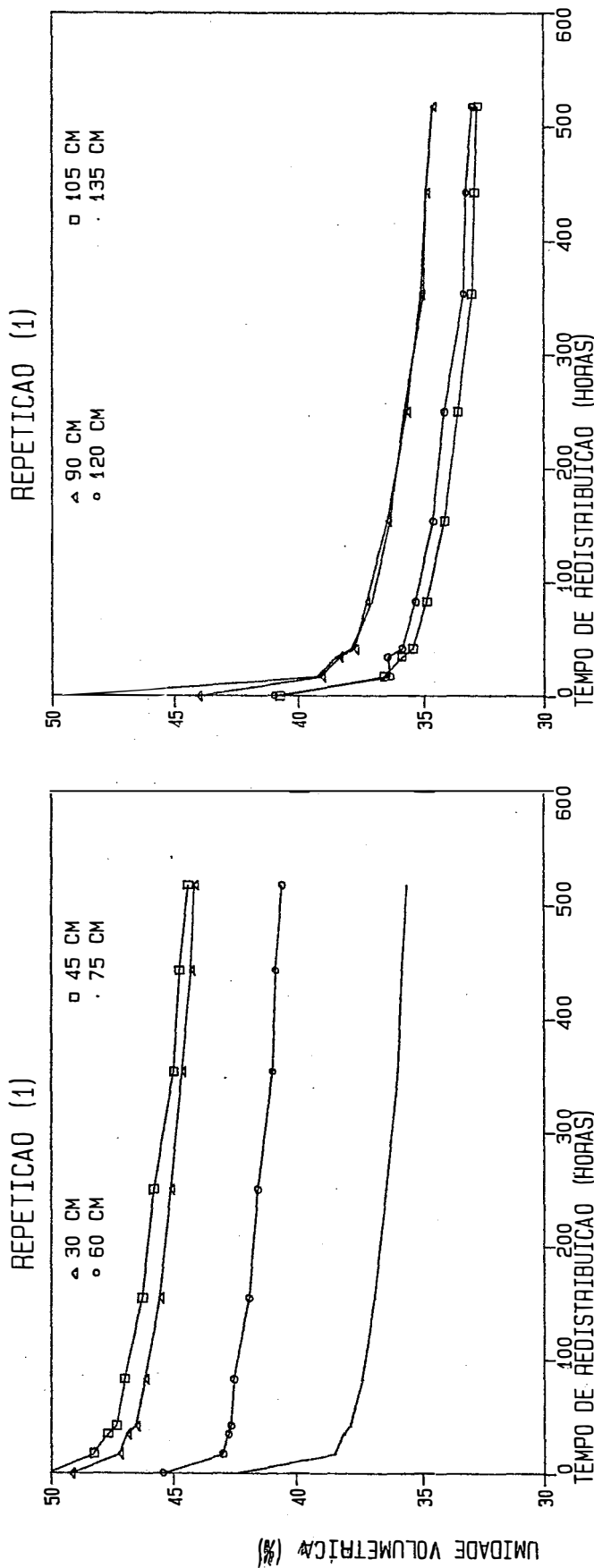


FIGURA 10 - Variação da unidade volumétrica nas diversas profundidades, durante o período de redistribuição. Repetição nº 1.

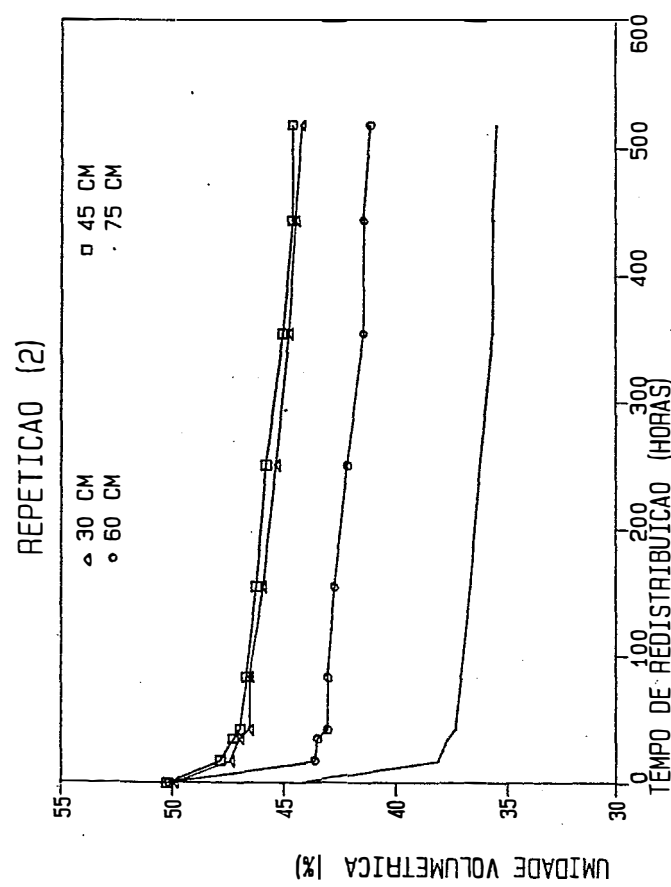
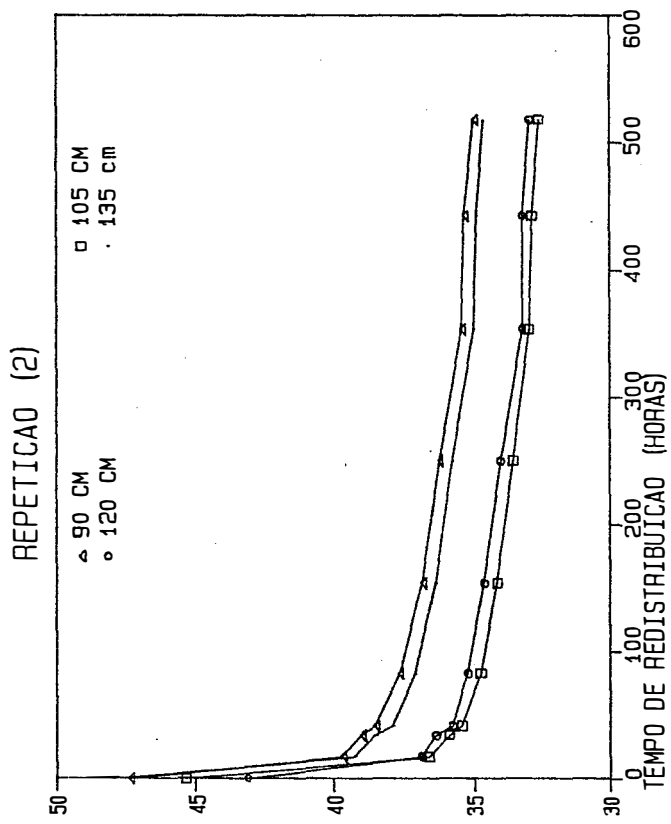


FIGURA 11 - Variação da umidade volumétrica nas diversas profundidades, durante o período de redistribuição. Repetição nº 2.

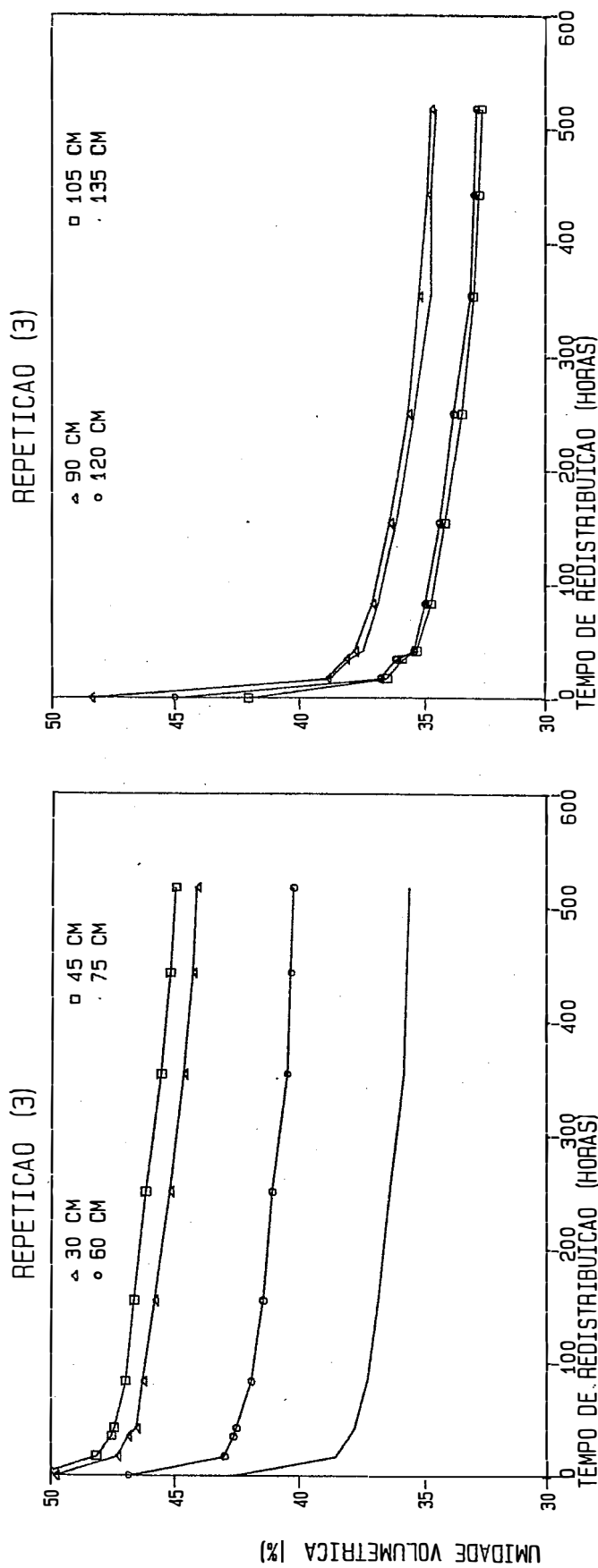


FIGURA 12 - Variação da umidade volumétrica nas diversas profundidades, durante o período de redistribuição. Repetição nº 3.

#### 4.2.2. Condutividade hidráulica do solo

Na Tabela 7 estão os coeficientes  $K_0$ ,  $\gamma$  e  $\theta_0$  de cada repetição nas profundidades calculadas a partir de LIBARDI et alii (1980) e os respectivos coeficientes de correlação ( $r$ ) obtidos a partir da análise de regressão dos dados de umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição  $((\theta - \theta_0) \times \log t)$  no perfil do solo. Os coeficientes pertencem à equação exponencial que define a condutividade hidráulica em função da umidade:

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

A equação exponencial que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade volumétrica do solo tem sido utilizada por uma série de autores nas mais diferentes condições de solo (NIELSEN et alii, 1973; REICHARDT et alii, 1978; CHOUDHURY e MILLAR, 1982; PREVEDELLO et alii, 1981; PAULA SOUZA et alii, 1979; CAVALCANTE et alii, 1978), sempre com altos coeficientes de correlação, parecendo portanto, ser de caráter geral, principalmente nos valores de umidade determinados em condição de campo.

Os valores de  $K_0$  (cm/h) por repetição crescem em função da profundidade, o que é natural devido ao aumento da porosidade total e redistribuição mais rápida. Isto é devido às diferenças de características morfológicas e físicas dos horizontes superficiais (até 60 cm) e profundos (75 - 135 cm). Pelos altos coeficientes de correlação ( $r > 0,97$ ), o modelo de umidade de LIBARDI et alii (1980) decreveu bem a redistribuição de água no perfil do solo Terra Roxa Estruturada, confirmando os resultados obtidos pelos autores no mesmo solo, perto do local deste experimento, e em um Latossolo Vermelho-Amarelo fase arenosa, também com altos coeficientes de

correlação.

Os valores médios de  $K_0$  (cm/h) para as diversas profundidades indicam também a tendência do seu aumento em profundidade, apesar das variações indicadas pelo desvio padrão. As variações são pequenas na superfície do solo (30 e 45 cm), da ordem de 24 a 49%, atingindo um máximo de 112% na profundidade 75 cm e caindo novamente a 58% nas profundidades de 90 e 135 cm. Embora, aparentemente grandes, as variações não diferem das variações naturais da condutividade hidráulica em condição "saturada" calculada por outros autores (NIELSEN et alii, 1973; SAUNDERS et alii, 1978; VIEIRA et alii, 1981; CAVALCANTE et alii, 1978; REICHARDT et alii, 1976).

Uma das fontes desta variação pode ser a incompleta saturação das diversas camadas do solo, apesar das 13 horas de aplicação de água. Isto resultou em diferentes umidades volumétricas no tempo  $t=0$  ou em equilíbrio dinâmico (BAKER et alii, 1974).

Na Tabela 7, abaixo da profundidade de 45 cm, os valores de maior umidade volumétrica na condição saturada geralmente são aqueles que possuem um valor maior de  $K_0$ . Isto não se repete em todas as profundidades devido a uma das suposições do método de LIBARDI et alii (1980), em que o coeficiente "a" da equação (13) é função da redistribuição da umidade volumétrica média  $((\bar{\theta} - \bar{\theta}) \times \ln t)$  em função do tempo, este coeficiente afeta diretamente o valor de  $K_0$ .

A partir dos dados de  $K_0$ ,  $\gamma$  e  $\theta_0$  e da equação (18), estão calculados, na Tabela 8, os valores de condutividade hidráulica ( $K = \text{cm/h}$ ) nas três repetições e diversas profundidades, correspondentes às umidades volumétricas ( $\theta, \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) de 0,45; 0,40;

0,35 e 0,30. Foi nessa faixa de umidade volumétrica que se desenvolveram as culturas de feijão e milho a maior parte do tempo (Figuras 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21). Na Tabela 9 estão os valores médios (desvio padrão) dos dados de umidade volumétrica da Tabela 8.

O coeficiente de variação dos dados de umidade volumétrica variam de 8% na camada de 30 cm ( $\theta = 0,45 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) a 166% na camada de 60 cm ( $\theta = 0,30 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ), levemente superior (112 - 166%) ao coeficiente de variação da condutividade hidráulica na condição saturada (Tabela 7). Devido à exponencialidade da função  $K(\theta)$  pequenas diferenças de umidade provocam grandes alterações no valor da condutividade. A média de todos os valores de condutividade na umidade  $0,45 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , é  $10^4$  vezes maior do que a média de todos os valores de condutividade a uma umidade volumétrica de  $0,35 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Quanto às diferenças na condutividade hidráulica entre os vários horizontes, pode-se observar que as profundidades de 30 e 45 cm têm comportamento semelhante, sendo as de menor condutividade em qualquer das umidades volumétricas apresentadas; a profundidade de 60 cm possui  $K$  intermediário e as profundidades de 75, 90, 105, 120 e 135 cm têm as maiores condutividades para quaisquer umidades volumétricas. Se for dado valor 1 para a condutividade hidráulica na profundidade de 30 cm e umidade volumétrica de  $0,45 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , pode-se construir a Tabela 10, que indica as diferenças relativas da função  $K(\theta)$  do solo em estudo.

As três camadas de solo estão bem distintas. na Tabela 10. As camadas de 30 e 45 cm, de baixos valores de  $K$ ; a camada de 60 cm, máxima expressão do horizonte B-textural, tendo os valores intermediários de condutividade hidráulica; e as camadas de 75, 90, 105, 120 e 135 cm, de maior condutividade hidráulica.

TABELA 7 - Parâmetros da equação da condutividade hidráulica não saturada segundo LIBARDI et alii (1980):  $K = K_0 e^{\gamma(\theta - \theta_0)}$ .

| Prof.<br>(cm) | Rep.      | $\frac{K_0}{\text{cm/h}}$ | $\gamma$  | $\frac{\theta_0}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}}$ | r        |
|---------------|-----------|---------------------------|-----------|---|----------|
| 30            | 1         | 0,12057                   | 111,71562 | 49,16   | 0,989127 |
|               | 2         | 0,20038                   | 109,97536 | 49,82   | 0,976508 |
|               | 3         | 0,166790                  | 103,70485 | 49,82   | 0,978685 |
|               | $\bar{x}$ | 0,163(0,04)               |           |   |          |
| 45            | 1         | 0,17322                   | 91,78143  | 50,13   | 0,989663 |
|               | 2         | 0,27448                   | 104,83008 | 50,13   | 0,982480 |
|               | 3         | 0,46468                   | 112,03416 | 50,58   | 0,985639 |
|               | $\bar{x}$ | 0,304(0,148)              |           |   |          |
| 60            | 1         | 0,22801                   | 145,59322 | 45,46   | 0,985746 |
|               | 2         | 2,32720                   | 134,06448 | 50,08   | 0,977362 |
|               | 3         | 0,99977                   | 120,51732 | 46,85   | 0,989421 |
|               | $\bar{x}$ | 1,185(1,062)              |           |   |          |
| 75            | 1         | 0,59295                   | 119,31848 | 42,43   | 0,988347 |
|               | 2         | 6,38289                   | 128,22739 | 44,21   | 0,982469 |
|               | 3         | 1,09413                   | 118,59193 | 42,73   | 0,984473 |
|               | $\bar{x}$ | 2,690(3,207)              |           |   |          |
| 90            | 1         | 0,97760                   | 75,74361  | 44,02   | 0,991451 |
|               | 2         | 4,11517                   | 72,67537  | 47,27   | 0,988901 |
|               | 3         | 3,12973                   | 81,96021  | 48,35   | 0,994748 |
|               | $\bar{x}$ | 2,740(1,605)              |           |   |          |
| 105           | 1         | 1,30558                   | 85,86920  | 40,67   | 0,993542 |
|               | 2         | 10,14704                  | 84,74504  | 45,29   | 0,992087 |
|               | 3         | 3,03448                   | 87,08989  | 42,03   | 0,991955 |
|               | $\bar{x}$ | 4,829(4,686)              |           |   |          |
| 120           | 1         | 1,70786                   | 91,79587  | 40,99   | 0,992447 |
|               | 2         | 4,13758                   | 84,70979  | 43,07   | 0,992770 |
|               | 3         | 6,81853                   | 86,27106  | 44,89   | 0,996302 |
|               | $\bar{x}$ | 4,221(2,556)              |           |   |          |
| 135           | 1         | 3,18032                   | 73,47293  | 49,25   | 0,993856 |
|               | 2         | 5,55848                   | 73,46205  | 47,82   | 0,993943 |
|               | 3         | 10,51103                  | 79,17732  | 48,66   | 0,996589 |
|               | $\bar{x}$ | 6,416(3,740)              |           |   |          |



TABELA 8 - Variação da condutividade hidráulica ( $K = \text{cm/h}$ ) do solo Terra Roxa Estruturada, calculada a partir da equação  $K = K_0 e^{\gamma(\theta - \theta_0)}$ , de LIBARDI et alii (1980). Coeficientes  $K_0$ ,  $\gamma$ ,  $\theta_0$  da Tabela 7.

| Prof. | Rep. | Umidade Volumétrica ( $\theta = \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) |          |          |           |
|-------|------|---|----------|----------|-----------|
|       |      | 0,45  | 0,40     | 0,35     | 0,30      |
| 30    | 1    | 1,16(-3)*   | 4,34(-6) | 1,63(-8) | 6,10(-11) |
|       | 2    | 9,94(-4)  | 4,09(-6) | 1,67(-8) | 6,85(-11) |
|       | 3    | 1,13(-3)  | 6,30(-6) | 3,53(-8) | 1,97(-10) |
| 45    | 1    | 1,56(-3)  | 1,59(-5) | 1,61(-7) | 1,64(-9)  |
|       | 2    | 1,27(-3)  | 6,71(-6) | 3,55(-8) | 1,88(-10) |
|       | 3    | 8,96(-4)  | 3,31(-6) | 1,22(-8) | 4,51(-11) |
| 60    | 1    | 1,71(-1)  | 8,05(-5) | 5,55(-8) | 3,82(-11) |
|       | 2    | 2,56(-3)  | 3,15(-6) | 3,86(-9) | 4,74(-12) |
|       | 3    | 1,08(-1)  | 2,60(-4) | 6,27(-7) | 1,52(-9)  |
| 75    | 1    | 1,27(1)   | 3,26(-2) | 8,37(-5) | 2,15(-7)  |
|       | 2    | 1,76(1)   | 2,89(-2) | 4,74(-5) | 7,79(-8)  |
|       | 3    | 1,62(1)   | 4,3(-2)  | 1,14(-4) | 3,04(-7)  |
| 90    | 1    | 2,05(0)   | 4,65(-2) | 1,05(-3) | 2,39(-5)  |
|       | 2    | 7,91(-1)  | 2,09(-2) | 5,52(-4) | 1,46(-5)  |
|       | 3    | 2,01(-1)  | 3,34(-3) | 5,54(-5) | 9,20(-7)  |
| 105   | 1    | 5,38(1)   | 7,34(-1) | 1,00(-2) | 1,37(-4)  |
|       | 2    | 7,94(0)   | 1,15(-1) | 1,66(-3) | 2,39(-5)  |
|       | 3    | 4,03(1)   | 5,18(-1) | 6,66(-3) | 8,55(-5)  |
| 120   | 1    | 6,78(1)   | 6,88(-1) | 6,99(-3) | 7,10(-5)  |
|       | 2    | 2,80(1)   | 5,20(-1) | 9,65(-3) | 1,79(-4)  |
|       | 3    | 7,5(0)  | 1,00(-1) | 1,35(-3) | 1,80(-5)  |
| 135   | 1    | 1,4(-1)   | 3,56(-3) | 9,03(-5) | 2,29(-6)  |
|       | 2    | 5,8(-1)   | 1,11(-2) | 2,11(-4) | 4,03(-6)  |
|       | 3    | 7,0(-1)   | 1,78(-2) | 4,52(-4) | 1,15(-5)  |

\*1,16(-3) representa  $1,16 \cdot 10^{-3}$

TABELA 9 - Média (desvio padrão) e coeficiente de variação (CV%) da condutividade hidráulica da Terra Roxa Estruturada, calculados a partir da equação  $K=K_0 e^{\gamma(\theta - \theta_0)}$ , de LIBARDI et alii (1980) para diversas umidades volumétricas.

| Prof. |           | Umidade Volumétrica ( $\theta = \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) |          |          |           |
|-------|-----------|---|----------|----------|-----------|
|       |           | 0,45  | 0,40     | 0,35     | 0,30      |
| 30    | $\bar{x}$ | 1,10(-3)*   | 4,91(-6) | 2,28(-8) | 1,09(-10) |
|       | $\sigma$  | 8,56(-5)  | 1,21(-6) | 1,09(-8) | 7,64(-11) |
|       | CV%       | 8   | 25       | 47       | 70        |
| 45    | $\bar{x}$ | 1,24(-3)  | 8,64(-6) | 6,96(-8) | 6,24(-10) |
|       | $\sigma$  | 3,33(-4)  | 6,51(-6) | 8,00(-8) | 8,82(-10) |
|       | CV%       | 27  | 75       | 115      | 141       |
| 60    | $\bar{x}$ | 7,6(-2)   | 1,15(-4) | 2,3(-7)  | 5,2(-10)  |
|       | $\sigma$  | 6,4(-2)   | 1,31(-4) | 3,45(-7) | 8,65(-10) |
|       | CV%       | 84  | 115      | 151      | 166       |
| 75    | $\bar{x}$ | 1,55(1)   | 3,48(-2) | 8,17(-5) | 1,99(-7)  |
|       | $\sigma$  | 0,25  | 7,31(-3) | 3,33(-5) | 1,14(-7)  |
|       | CV%       | 16  | 21       | 41       | 57        |
| 90    | $\bar{x}$ | 1,01(0)   | 2,36(-2) | 5,52(-4) | 1,31(-5)  |
|       | $\sigma$  | 0,94(0)   | 2,17(-2) | 4,97(-4) | 1,16(-5)  |
|       | CV%       | 93  | 92       | 90       | 88        |
| 105   | $\bar{x}$ | 3,40(1)   | 4,56(-1) | 6,11(-3) | 8,21(-5)  |
|       | $\sigma$  | 2,36(1)   | 3,14(-1) | 4,20(-3) | 5,66(-5)  |
|       | CV%       | 69  | 69       | 69       | 69        |
| 120   | $\bar{x}$ | 3,44(1)   | 4,36(-1) | 5,99(-3) | 8,93(-5)  |
|       | $\sigma$  | 3,07(1)   | 3,02(-1) | 4,24(-3) | 8,21(-5)  |
|       | CV%       | 89  | 69       | 71       | 92        |
| 135   | $\bar{x}$ | 4,73(-1)  | 1,08(-2) | 2,51(-4) | 5,94(-6)  |
|       | $\sigma$  | 2,95(-1)  | 7,12(-3) | 1,84(-4) | 4,89(-6)  |
|       | CV%       | 62  | 66       | 73       | 82        |

\*1,10(-3) representa  $1,10 \cdot 10^{-3}$

TABELA 10 - Valores relativos aproximados da condutividade hidráulica ( $K = \text{cm/h}$ ) para a Terra Roxa Estruturada, considerando-se a umidade volumétrica na profundidade de 30 cm como denominador comum dos valores de  $K$  da Tabela 3, aproximado para uma cada decimal.

| Prof. | Umidade Volumétrica ( $\Theta = \text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) |       |       |       |
|-------|---|-------|-------|-------|
|       | 0,45  | 0,40  | 0,35  | 0,30  |
| 30    | 1(0)*   | 4(-3) | 2(-5) | 1(-7) |
| 45    | 1(0)  | 8(-3) | 6(-5) | 6(-7) |
| 60    | 7(1)  | 1(-1) | 2(-4) | 5(-7) |
| 75    | 1(4)  | 3(1)  | 7(-2) | 2(-4) |
| 90    | 9(2)  | 2(1)  | 5(-1) | 1(-2) |
| 105   | 3(4)  | 4(2)  | 6(0)  | 7(-2) |
| 120   | 3(4)  | 4(2)  | 5(0)  | 8(-2) |
| 135   | 4(3)  | 1(1)  | 2(-1) | 5(-3) |

\* O valor 1(0) representa  $1 \cdot 10^0$ .

#### 4.2.3. Capacidade de campo da Terra Roxa Estruturada

A capacidade de campo é a umidade do solo resultante do processo de drenagem do excedente de água que entrou no sistema via precipitação ou irrigação (VEIHMEYER & HENDRICKSON, 1949). Parâmetro muito discutido na literatura quanto à melhor metodologia de sua determinação, é extremamente útil para projetos de Irrigação e Drenagem, pois é o valor de retenção máxima de água pelo solo. Métodos de laboratório que aplicam uma tensão de  $1 \cdot 10^{-3}$  MPa ou  $3,3 \cdot 10^{-2}$  MPa são discutíveis, pois não representam a capacidade de campo medida no terreno (REICHARDT, 1975).

Na Tabela 11 estão os valores médios das três últimas determinações de umidade volumétricas nos tempos de redistribuição de 353, 443 e 518 horas, que dão uma boa referência da umidade volumétrica na capacidade de campo nos vários horizontes e os respectivos potenciais matriciais (calculados a partir das curvas de retenção - Tabela 4) e a condutividade hidráulica, a partir da Tabela 7.

Os valores de umidade volumétrica ( $\theta$ ) do solo na capacidade de campo variaram de aproximadamente 44,5% nas camadas de 30 e 45 cm, 41% na de 60 cm e 34,3% na camada de 75 a 135 cm. Os valores de potencial matricial correspondentes aos valores de  $\theta_{cc}$  foram de 80 cm de água para as camadas de 30 e 45 cm, 100 cm de água para a camada de 60 cm e 177 cm de água para as camadas de 75-135 cm. Estes valores refletem bem o efeito das características morfológicas e físicas dos vários horizontes do perfil do solo nas propriedades de retenção (curva de retenção de água) e movimento de água (condutividade hidráulica do solo).

TABELA 11 - Capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e seus respectivos potencial matricial ( $\psi_m$ ) e condutividade hidráulica (K).

|       | $\theta_{cc}$<br>( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | $\psi_m$<br>(cm água) | K<br>(cm/h)                                     |
|-------|---|-----------------------|---|
| 30    | 44,35(0,22)*  | 79(0,47)*             | $5,41 \cdot 10^{-4}$ ( $4,54 \cdot 10^{-5}$ )** |
| 45    | 44,87(0,34)   | 80(0,58)              | $1,09 \cdot 10^{-3}$ ( $3,08 \cdot 10^{-4}$ )   |
| 60    | 40,80(0,38)   | 99(0,62)              | $3,61 \cdot 10^{-4}$ ( $3,4 \cdot 10^{-4}$ )    |
| 75    | 35,75(0,19)   | 160(0,44)             | $2,02 \cdot 10^{-4}$ ( $7,7 \cdot 10^{-5}$ )    |
| 90    | 34,99(0,31)   | 179(0,56)             | $3,82 \cdot 10^{-4}$ ( $5,8 \cdot 10^{-4}$ )    |
| 105   | 32,78(0,14)   | 178(0,37)             | $9,02 \cdot 10^{-4}$ ( $6,21 \cdot 10^{-4}$ )   |
| 120   | 33,06(0,17)   | 187(0,41)             | $7,64 \cdot 10^{-4}$ ( $4,71 \cdot 10^{-4}$ )   |
| 135   | 34,74(0,17)   | 181(0,41)             | $2,07 \cdot 10^{-4}$ ( $1,52 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Média |   |                       | $5,56 \cdot 10^{-4}$ ( $3,30 \cdot 10^{-4}$ )   |

\* média de 9 valores

\*\* média de 3 valores

Os valores de condutividade hidráulica ( $k = \text{cm/h}$ ) na umidade do solo na capacidade de campo, no entanto, variaram de menos de uma ordem de grandeza ( $CV = 59\%$ ) entre as diversas camadas do perfil do solo. Pode-se afirmar que, apesar das inúmeras diferenças nas características e propriedades do solo, perto do valor de umidade na capacidade de campo nas diversas camadas do solo, a condutividade hidráulica varia de menos de uma ordem de grandeza.

SAUNDERS (1978) encontrou valores mais baixos de  $\theta_{cc}$  nas camadas de 30, 60 e 90 cm (34,8; 31,9 e 29,6%, respectivamente) e semelhantes na profundidade de 120 cm (33,5%) no mesmo solo, refletindo a variação destes valores para o solo em questão.

#### 4.3. Balanço hídrico das culturas de feijão e milho

A partir dos dados de tensiometria, foram calculados os valores de drenagem profunda e armazenamento de água no solo. Utilizaram-se a equação da curva de retenção do modelo de VAN GENUCHTEN (1980) para o cálculo da umidade volumétrica e o modelo de LIBARDI et alii (1980) para o cálculo da drenagem profunda.

A evapotranspiração média foi calculada nas diversas fases de desenvolvimento da cultura, segundo DOORENBOS e PRUITT (1979). A fase de estabelecimento da cultura e desenvolvimento vegetativo foram somadas e resultaram na fase 1a. denominada de período vegetativo; a 2a., floração; a 3a., formação das vagens (ou espigas); e a 4a., maturação (DOORENBOS e PRUITT, 1975; DOORENBOS e

KASSAN, 1979). As amostragens de plantas para determinação da massa seca vegetal foram efetuadas aproximadamente no meio de cada fase de desenvolvimento das culturas. Foi efetuada a amostragem na colheita da parcela experimental para o cálculo da produção de grãos. O cálculo dos vários fatores influentes no balanço hídrico foram feitos por repetição, a fim de se ter uma avaliação da variabilidade de retenção, movimento e absorção de água pelas culturas na área experimental.

#### 4.3.1. Cultura de feijão

O plantio tardio da cultura de feijão (março/abril) deveu-se a problemas na determinação da função  $K(\theta)$ . O total de água que a cultura recebeu via precipitação e irrigação (320,69 mm) foi suficiente para o seu desenvolvimento, proporcionando uma produção de 4176 Kg/ha de massa vegetal total seca por hectare e 1487,92 Kg/ha de grãos (seco em estufa a 60°C até peso constante) (Tabela 24). A distribuição de chuvas foi irregular: 57% do total na fase de desenvolvimento vegetativo, 36% na floração e 7% na formação da panícula; na maturação da vagem até a colheita, não choveu. O desenvolvimento vegetativo do feijoeiro foi rápido e em aproximadamente 30 dag cobriu totalmente o terreno. O fato de não terem sido feitas medidas de umidade na superfície do solo superestimou os valores de evapotranspiração devido aos baixos valores ou positivos de variação de armazenamento ( $\Delta A$ ).

Na Figura 13 está uma representação do balanço hídrico da cultura de feijão na profundidade de 60 cm (onde foram encontrados os valores máximos de evapotranspiração calculada). Os

dados desta figura estão na Tabela 18.

A evapotranspiração da cultura é aproximadamente o mesmo valor da precipitação e os valores de drenagem profunda e variação de armazenamento muito pequenos. O deflúvio superficial foi considerado nulo, embora seja outro fator que cooperou na superestimativa da evapotranspiração na cultura de feijão, como será discutido adiante.

Houve uma variação no conteúdo de água entre o início das leituras dos tensiômetros (18/04) e a data da colheita (08/07), indicando que durante o período da cultura houve retirada de água do perfil todo de solo analisado (0-135 cm) ( Figura 14 ).

Durante o desenvolvimento da cultura, no entanto, a água foi retirada principalmente da camada de 0-60 cm, mantendo-se a umidade volumétrica praticamente constante nas profundidades de 75-135 cm, como demonstram os diversos perfis de umidade das Figuras 15 e 16.

#### 4.3.2. Cultura de milho

A cultura de milho foi plantada na época adequada, tendo se desenvolvido normalmente. O total de precipitação durante o ciclo da cultura foi alto (845,90 mm) e distribuído pelas diversas fases da cultura, cobrindo as necessidades para o seu desenvolvimento (WALDREN, 1983; DOORENBOS e KASSAN, 1979).

A produção de massa vegetal seca total média foi de 20253 Kg/ha, com uma produção de grãos (seco em estufa a 60°C, até peso constante) de 8869 Kg/ha. No fim do período vegetativo (50-67 dag) houve baixa precipitação ( $\approx$  25 mm), mas não houve sintomas vi-



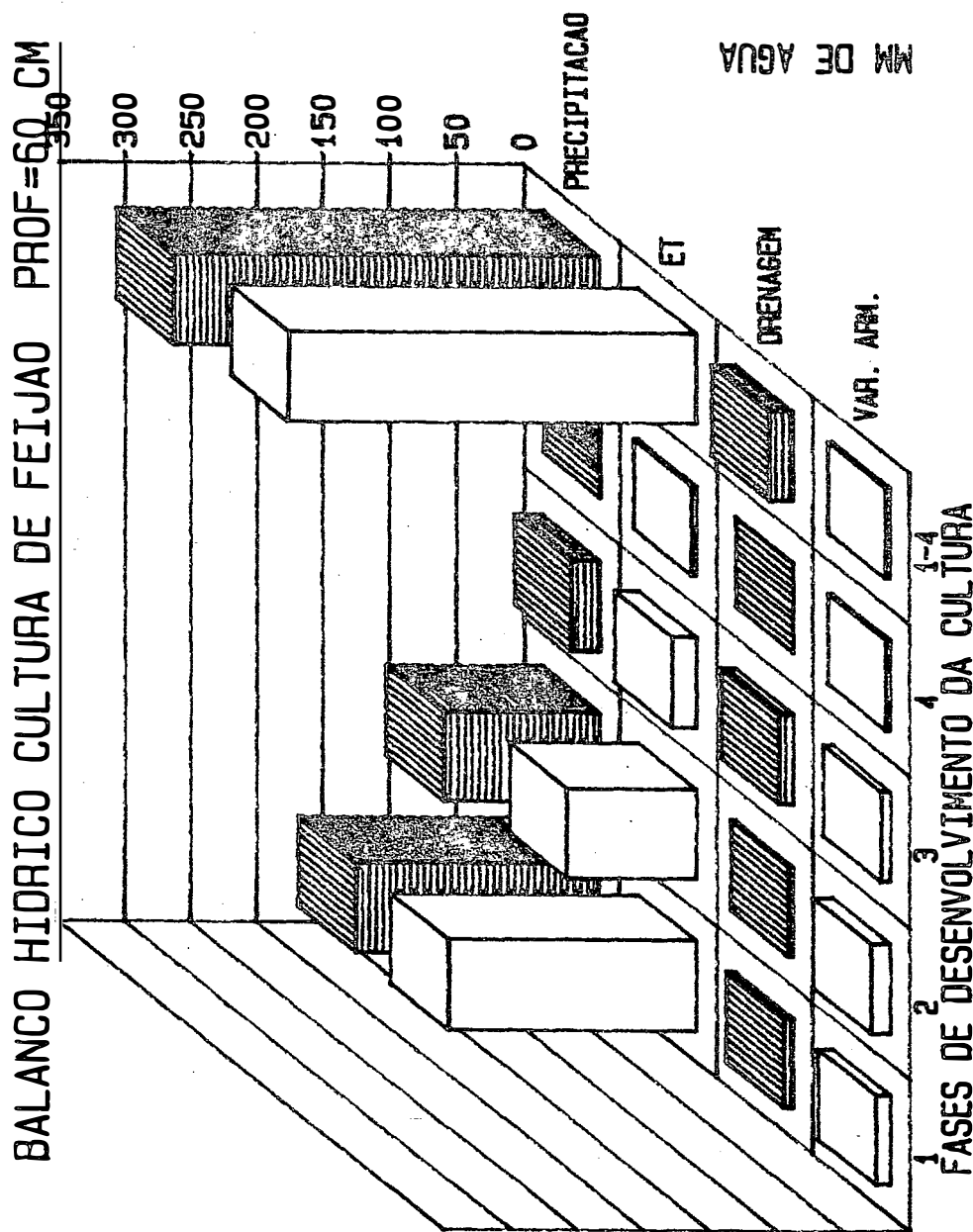


FIGURA 13 - Balanço hídrico da cultura de feijão (Phaseolus vulgaris L.), cultivar carioca, na profundidade de 60 cm.

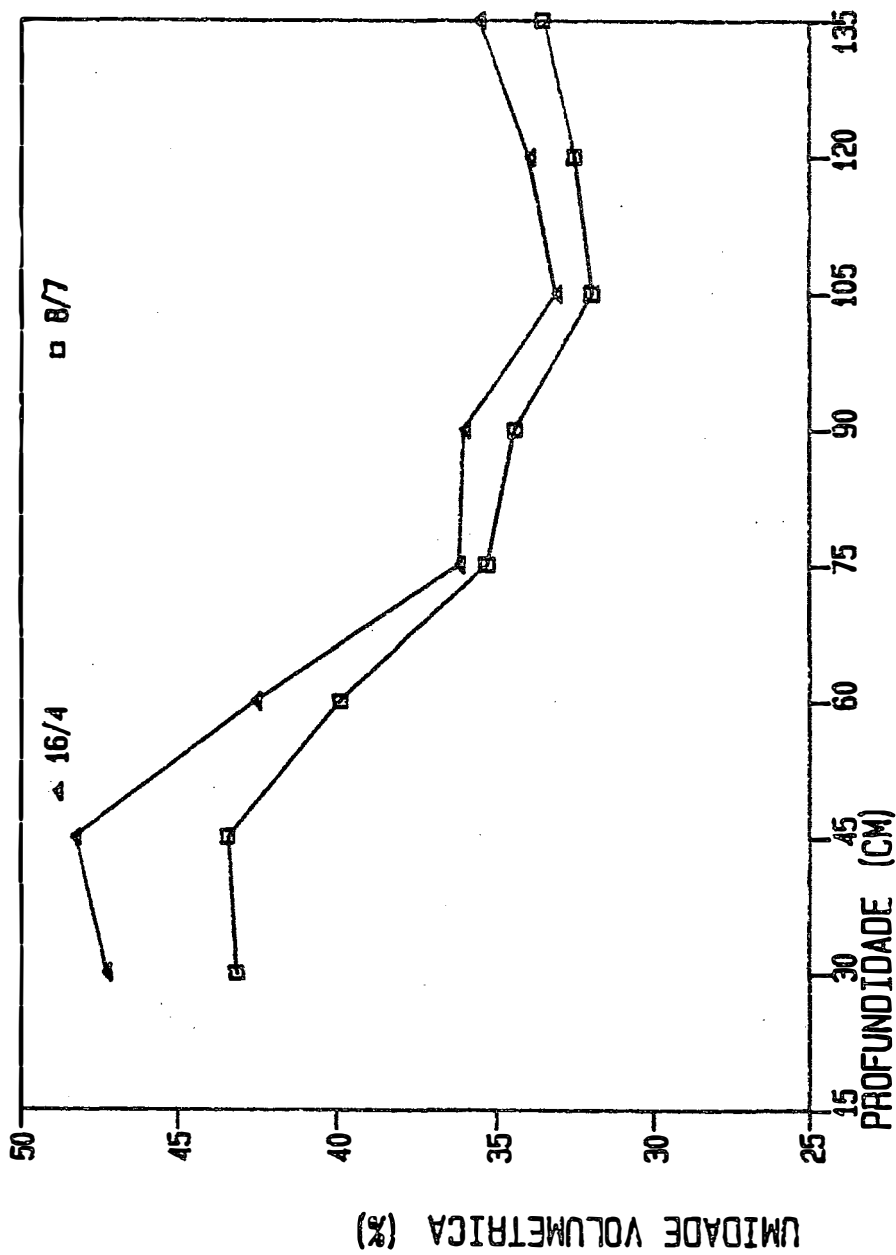


FIGURA 14 - Umidade volumétrica em função da profundidade, nos dias 16/04 e 08/07 (plântio-colheita) da cultura de feijão.

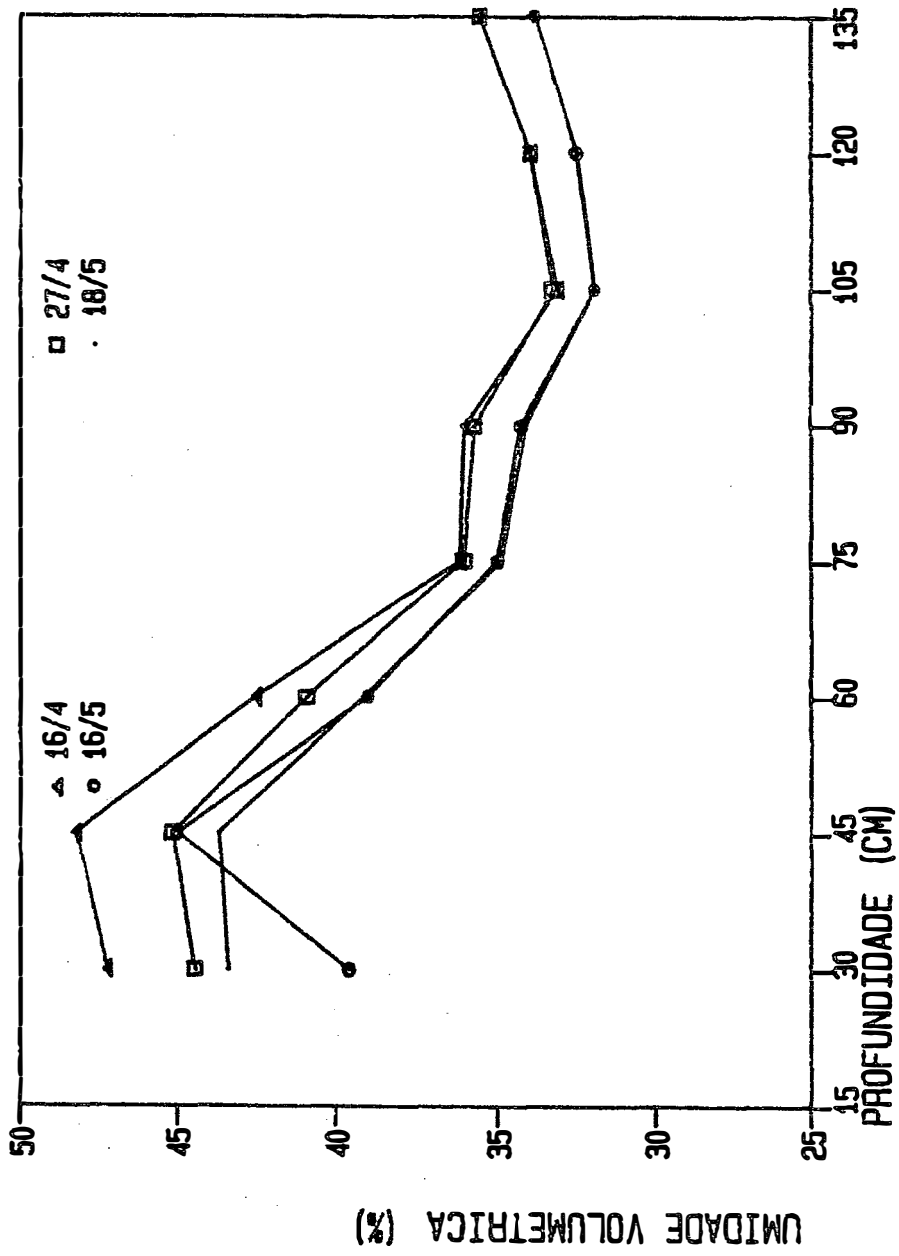


FIGURA 15 - Umidade volumétrica em função da profundidade da cultura de feijão.

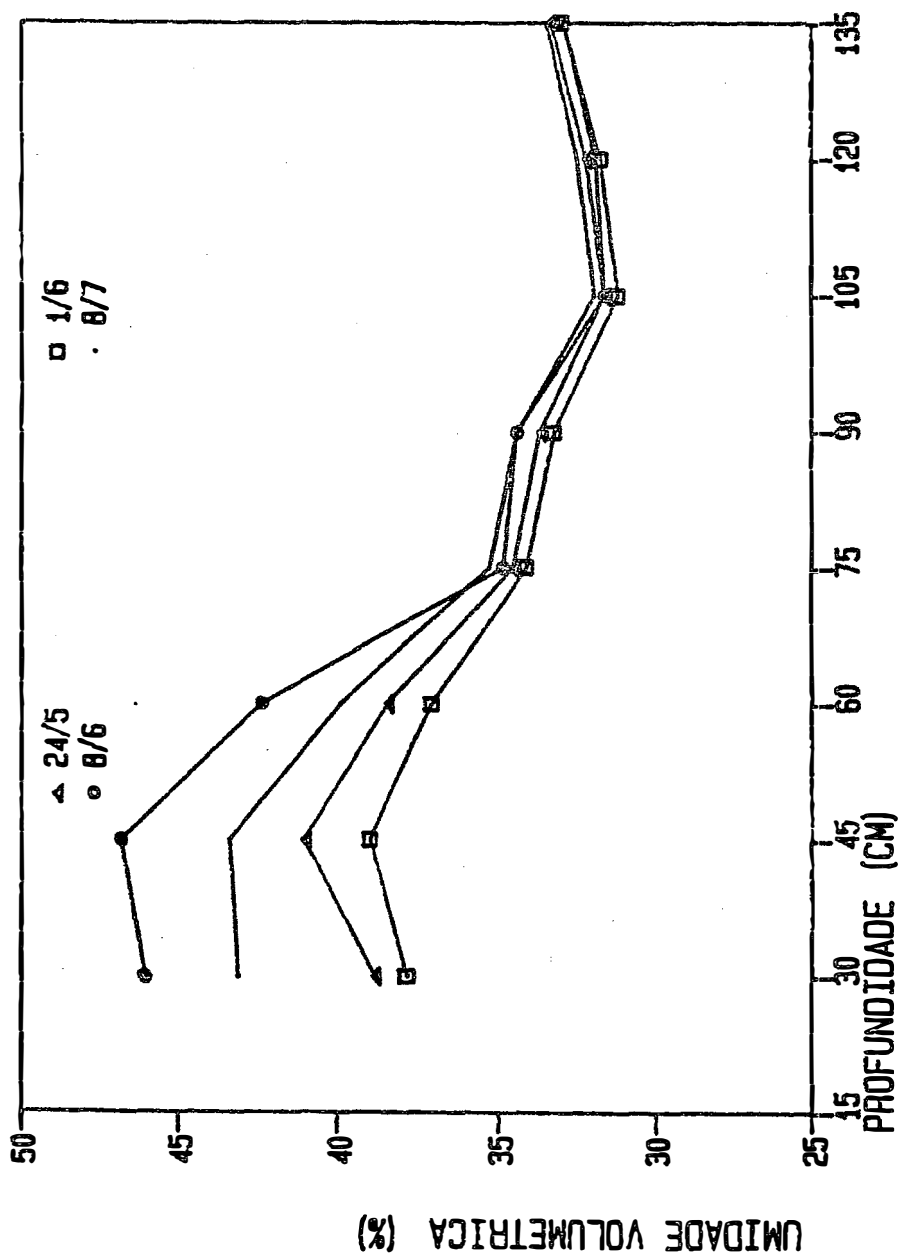


FIGURA 16 - Umidade volumétrica em função da profundidade da cultura de feijão.

síveis de estresse hídrico que implicasse em irrigação suplementar. Além de ser uma das culturas mais eficientes na utilização de água (MARINS et alii, 1976), a cultura de milho tem capacidade de extrair 20% da água disponível do solo, antes que ocorra decréscimo na taxa de transpiração (RITCHIE, 1973).

A estimativa da evapotranspiração foi prejudicada pela não contabilização da variação de armazenagem na camada de 0-22,5 cm. A alta pluviosidade e a razoável distribuição de chuvas deve ter favorecido o desenvolvimento do sistema radicular nas camadas mais próximas à superfície. MAYAKI et alii (1976) encontraram 64% da massa do sistema radicular em condições ótimas de umidade (chuva + irrigação) nos primeiros 30 cm do solo.

Na Figura 17 estão os valores médios (das três repetições) dos componentes do balanço hídrico da camada 0-60 cm. Abaixo da profundidade de 60 cm, o cálculo da evapotranspiração mostrou que ela se manteve praticamente constante, como será mostrado adiante.

Tanto a drenagem profunda como a variação de armazenagem medidas a 60 cm tiveram pouca influência na evapotranspiração. Esta teve uma relação direta com a precipitação, tanto em cada fase como no período total de desenvolvimento da cultura.

A umidade volumétrica praticamente não variou entre o início das leituras nos tensiômetros e a colheita (Figura 18). No final do período de desenvolvimento vegetativo, em que houve baixa precipitação, o perfil todo (0-135 cm) secou, o que poderia indicar a presença do sistema radicular abaixo de 60 cm (WALDREN, 1983; DOORENBOS & KASSAN, 1979). No entanto, isto não causou aumento da evapotranspiração, quando se considerou para o balanço um  $z > 60$  cm (ver Figura 25). Na Figura 19

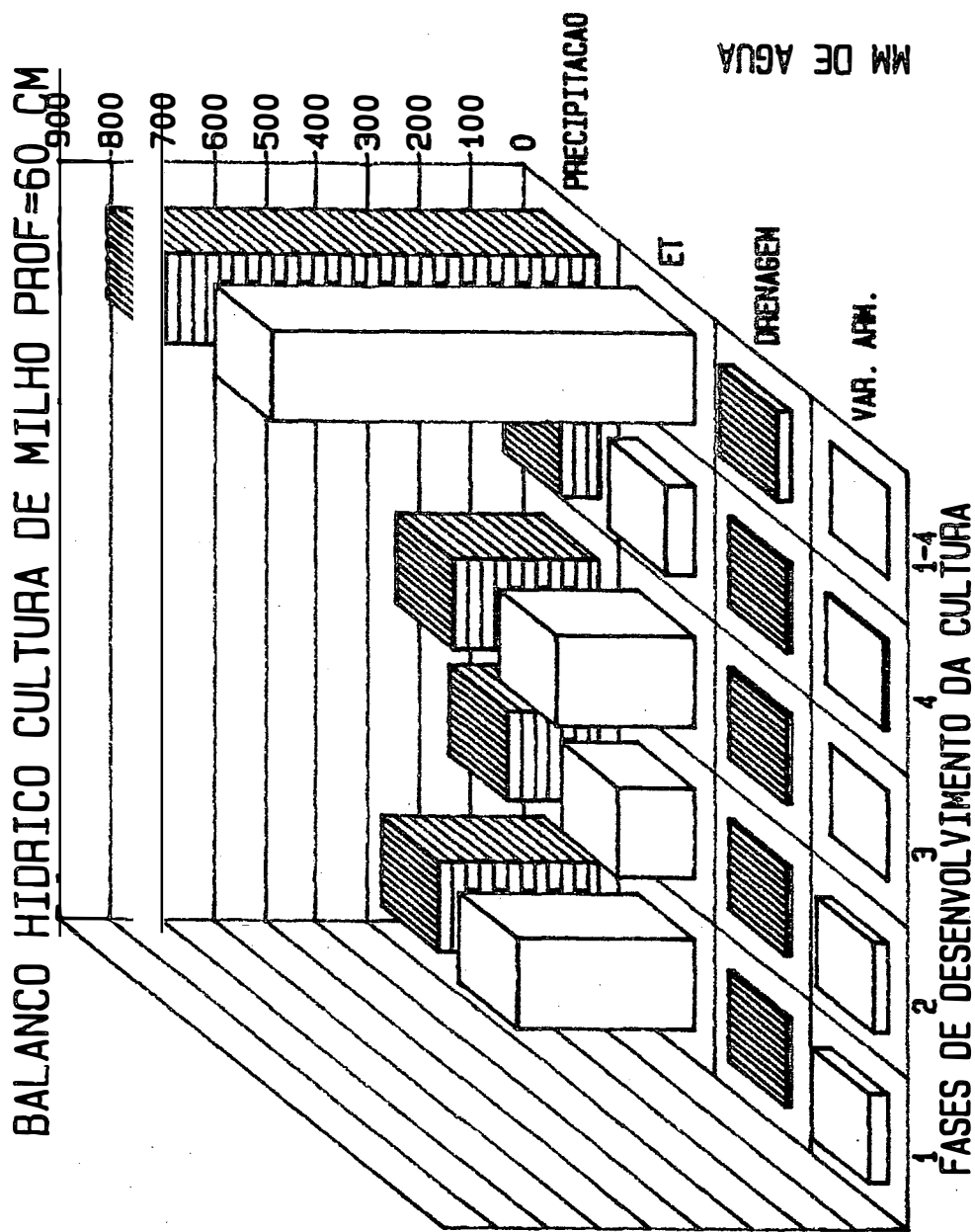


FIGURA 17 - Balanço hídrico da cultura de milho (Zea mays L.), cultivar Cargill-501, na profundidade de 60 cm.

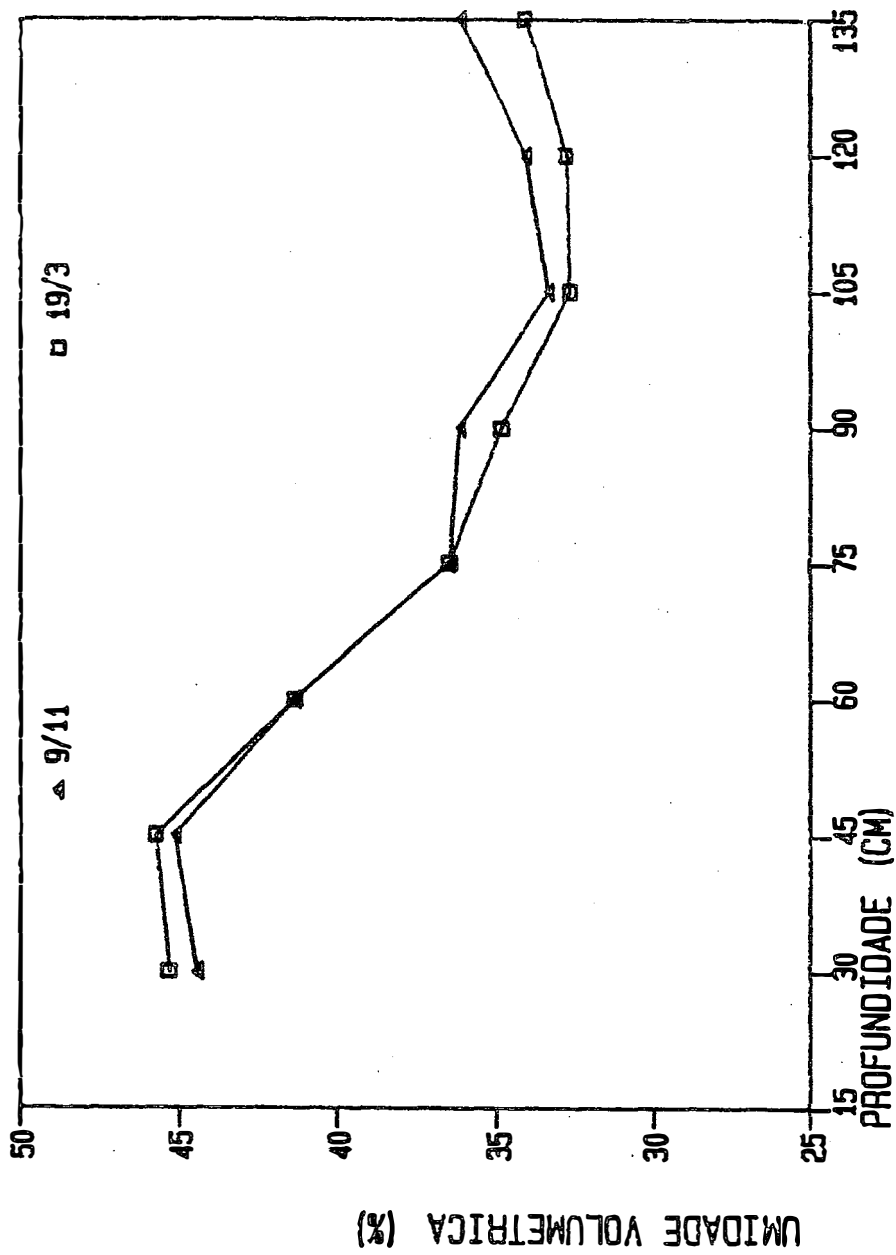


FIGURA 18 - Umidade volumétrica em função da profundidade, nos dias 09/11 e 19/03 (plantio-colheita) da cultura de milho.

estão quatro perfis de umidade volumétrica que indicam o secamento sucessivo das diversas camadas de solo na fase de desenvolvimento vegetativo da cultura.

Somente na cultura de milho houve gradiente hidráulico positivo. A ascensão capilar, no entanto, foi desprezível em termos do balanço hídrico. Isto pode ser visualizado na Figura 23.

Nas Figuras 20 e 21 estão outros perfis de umidade ( $\theta \times z$ ). Após a primeira fase, as variações na umidade volumétrica aconteceram principalmente na camada de 0-60 cm, havendo pequenas flutuações na umidade volumétrica, abaixo desta profundidade.

#### 4.3.3. Evapotranspiração das culturas de feijão e milho

Nas Tabelas 12, 13, 14, 15, 16 e 17 estão os valores de evapotranspiração calculados para as culturas de feijão e milho. As tabelas de precipitação, evaporação Classe A (não corrigido), e evapotranspiração (PENMAN, 1948) estão no Apêndice. Nas Tabelas 12 e 13 estão os valores de evapotranspiração calculada por fase de desenvolvimento da cultura, por repetição e por profundidade.

A profundidade de instalação do primeiro tensiômetro foi 30 cm. Supondo que a zona de influência do tensiômetro seja de 15 cm, aproximadamente, o tensiômetro na profundidade de 30 cm mede o potencial matricial que corresponde à umidade "média" da camada de 22,5 - 37,5 cm. Na camada de 0 - 22,5 cm não se teve medida do potencial matricial e, conseqüentemente, da umidade volumétrica. Para efeito do cálculo da drenagem profunda do balanço hídrico, a profundidade mínima de medida é 45 cm, pois o gradiente de potencial hidráulico é medido entre as profundidades de 30 e 60 cm, o que é



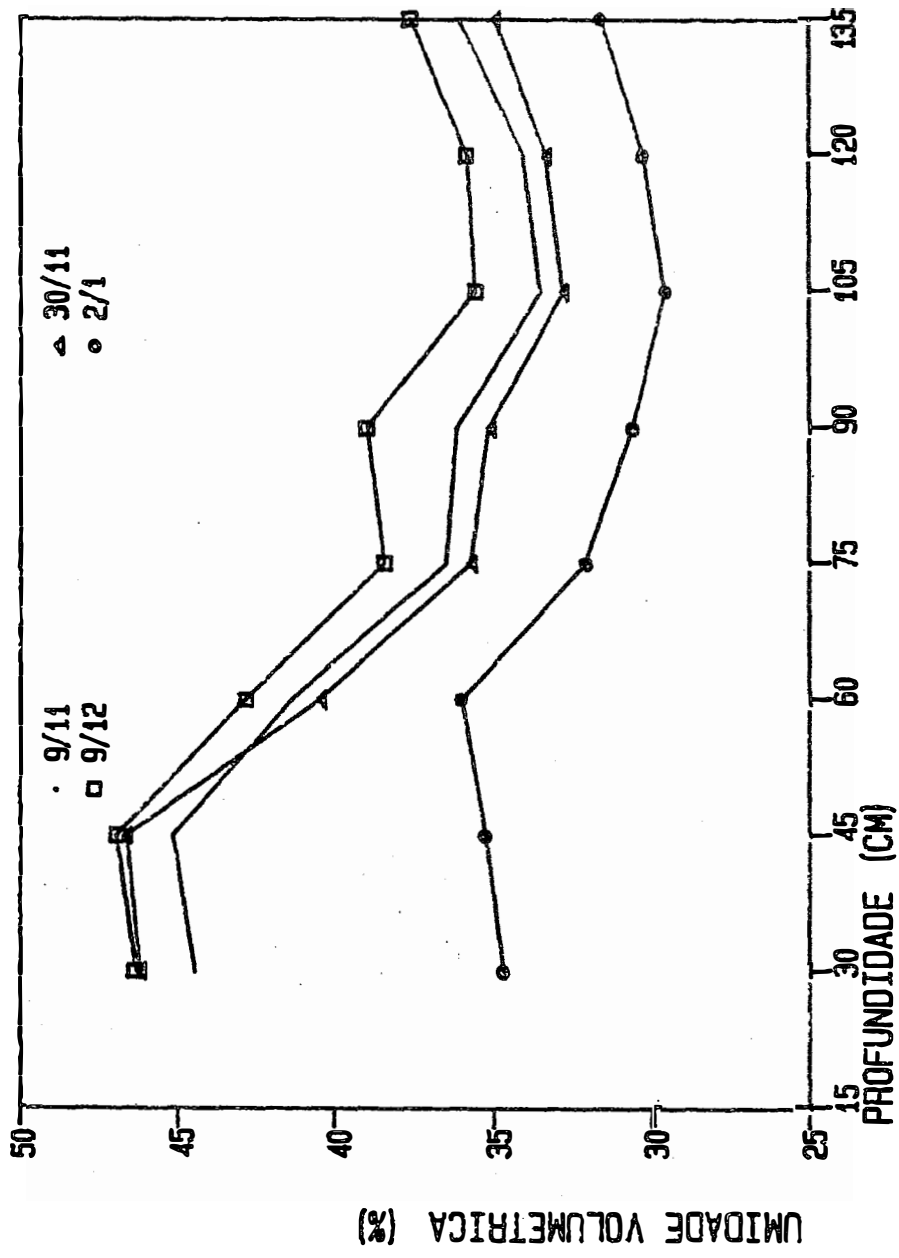


FIGURA 19 - Umidade volumétrica em função da profundidade, em quatro datas da cultura de milho.

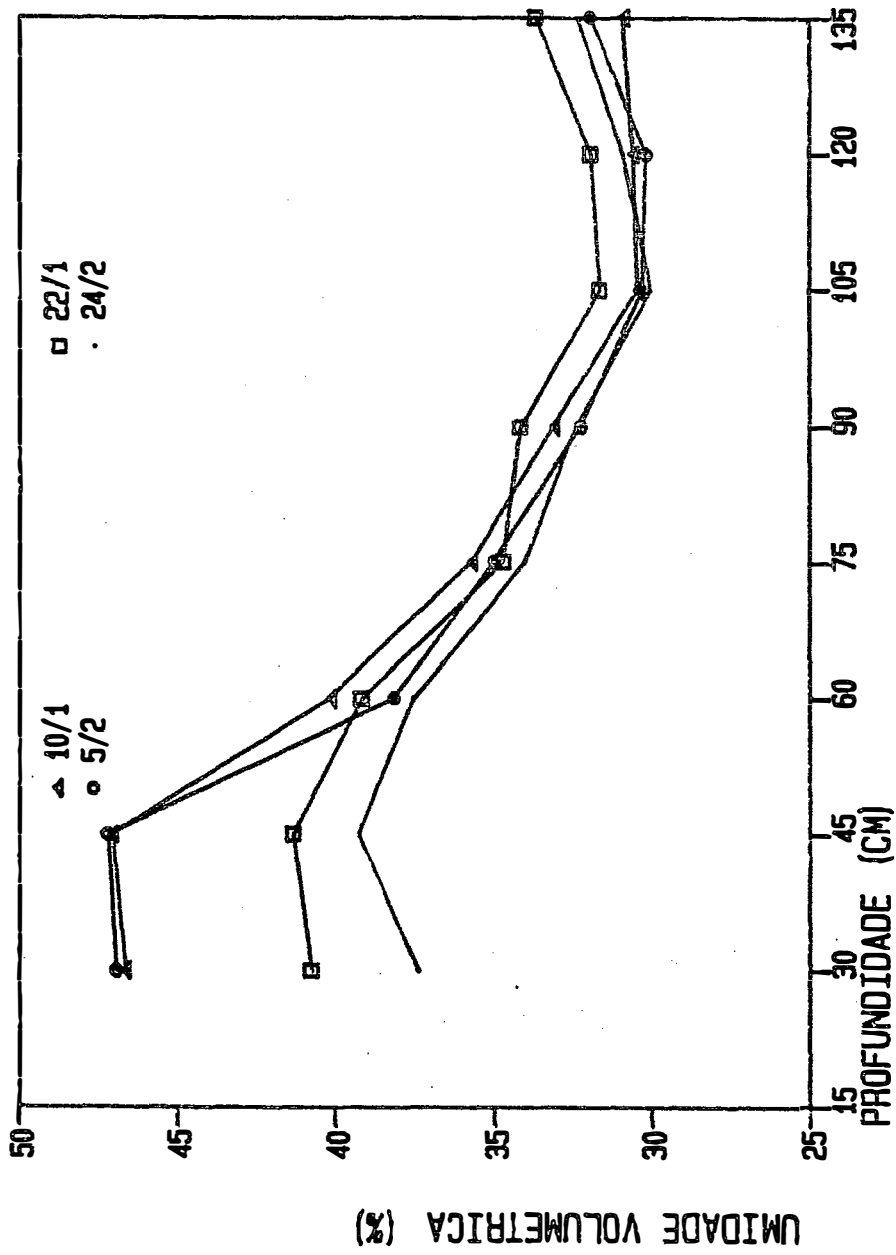


FIGURA 20 - Umidade volumétrica em função da profundidade, em quatro datas da cultura de milho.

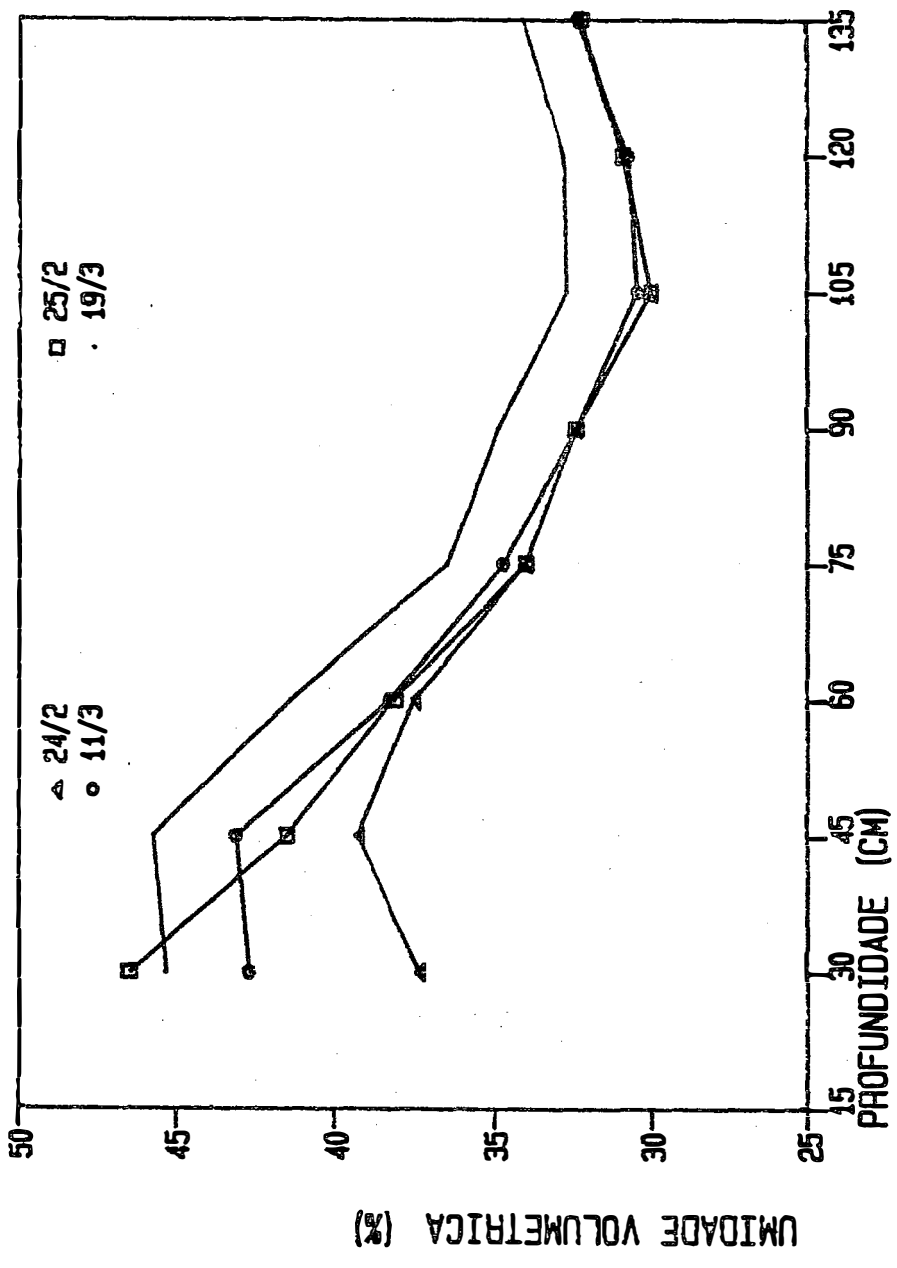


FIGURA 21 - Umidade volumétrica em função da profundidade, em quatro datas da cultura de milho.

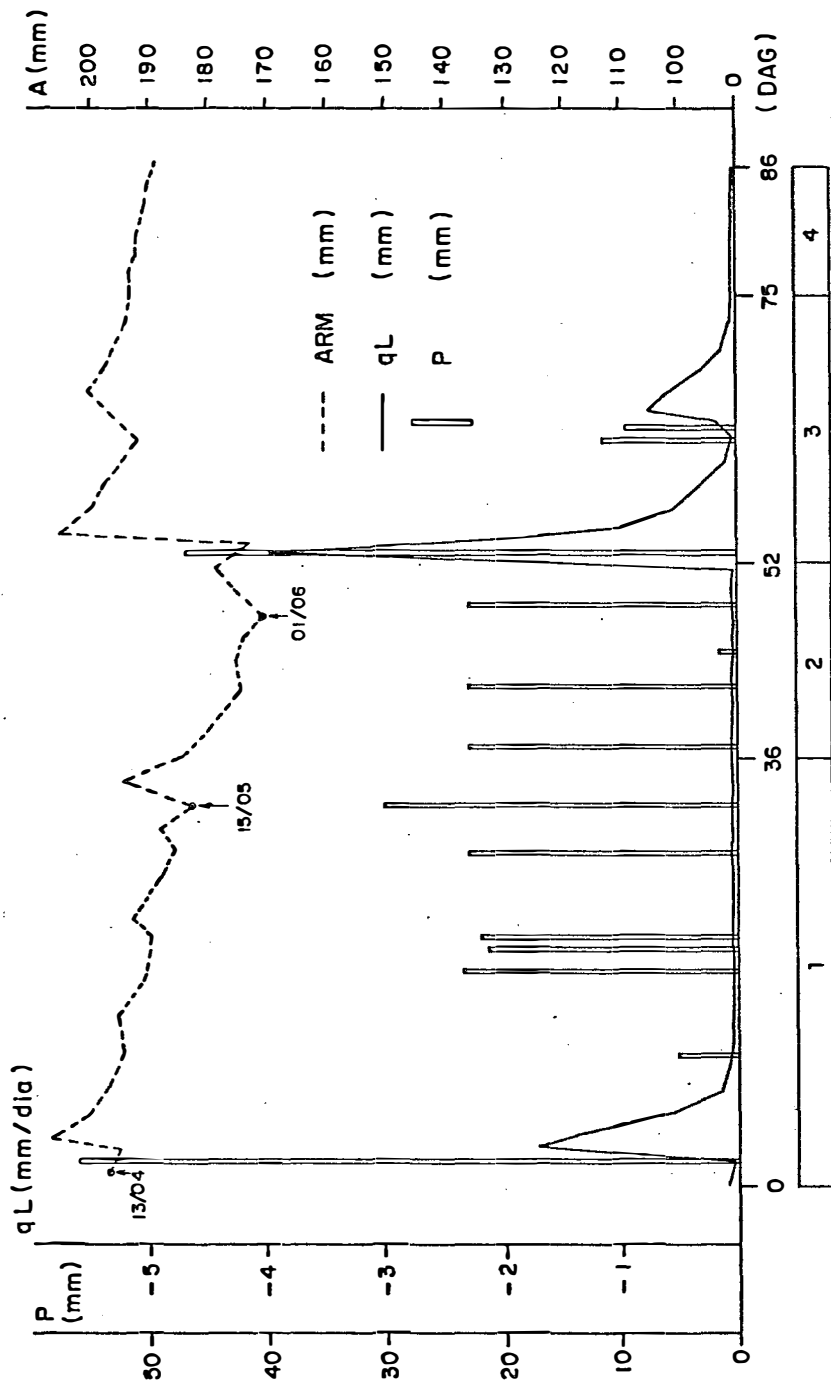


FIGURA 22 - Armazenagem de água, drenagem profunda e precipitação na profundidade de 60 cm da cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar carioca, em quatro fases do desenvolvimento da cultura.

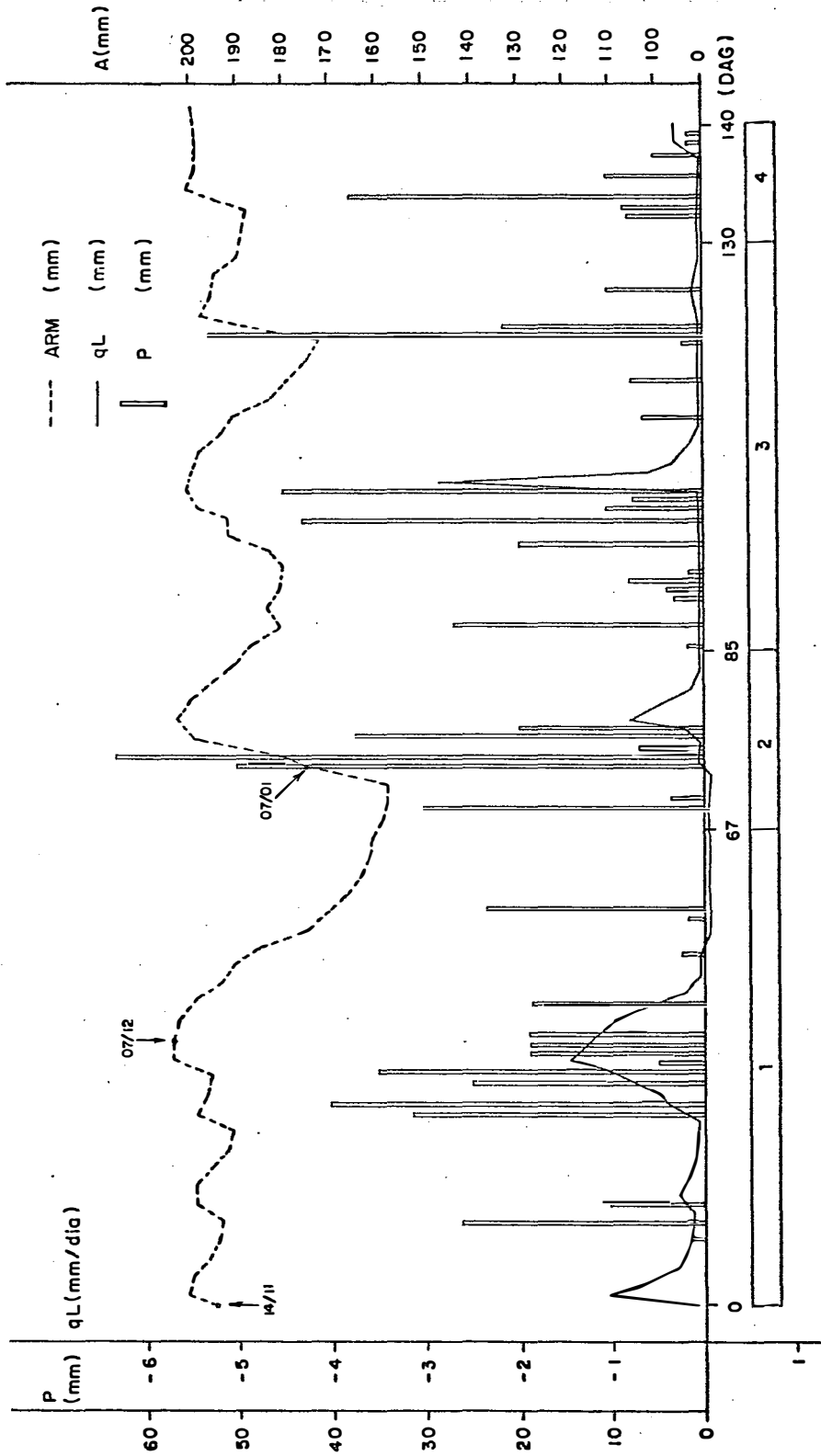


FIGURA 23 - Armazenagem de água, drenagem profunda e precipitação na profundidade de 60 cm da cultura de milho (*Zea mays* L.) cultivar Cargill-501, em quatro fases do desenvolvimento da cultura.

razoável, já que tanto a cultura de milho como a de feijão podem ter seus sistemas radiculares desenvolvidos em maior profundidade (WALDREN, 1983; DOORENBOS e KASSAN, 1979; MAYAKI et alii, 1976; CASTRO, 1979; BERGAMASCHI, 1984; GARRIDO et alii, 1978).

O problema da não determinação da umidade volumétrica na camada de aproximadamente 0-22,5 cm é o erro no cálculo da variação de armazenamento nas diversas fases de desenvolvimento da cultura.

ROUSE e WILSON (1971/72), num experimento intensivamente monitorado por equipamentos para o cálculo do balanço hídrico de uma cultura de milho, concluíram que o valor de evapotranspiração era tão mais preciso quanto maior fosse a variação de armazenamento no intervalo de tempo considerado. Em períodos de alta evapotranspiração e sem precipitação, o método do balanço hídrico forneceu as melhores estimativas da evapotranspiração. Em períodos de alta precipitação, onde a variação de armazenamento é nula ou positiva, os valores de evapotranspiração são baixos ou positivos. ROUSE e WILSON (1971/72) recomendam que nestes períodos as determinações de umidade tenham um intervalo superior a uma semana. BLACK et alii (1970), ao contrário, indicam que o intervalo de amostragem de umidade volumétrica em períodos de alta precipitação deve ser pequeno, e que várias determinações devem ser feitas no mesmo dia, espaçando conforme o secamento do solo. BERGAMASCHI (1984) teve o mesmo problema que ROUSE e WILSON (1971/72) e concluiu que a evapotranspiração calculada pelo método do balanço hídrico superestimou a evapotranspiração real da cultura de feijão. BERGAMASCHI (1984) concluiu que isso se deveu, principalmente, a três razões: a não contabilização da variação de armazenamento na camada de 0-15 cm,

não determinação do deflúvio superficial, embora a área tivesse pequena declividade e ao cálculo da drenagem profunda ter sido feito com uma só equação para uma área experimental de 3600 m<sup>2</sup>.

Nas Figuras 22 e 23 está a distribuição dos valores de precipitação (P), drenagem profunda ( $q_L$ ) e armazenamento de água necessários ao cálculo da evapotranspiração das culturas de feijão e milho na profundidade de 60 cm (repetição 3). Nos períodos que vão de 15/05 a 01/06 para a cultura de feijão e 07/12 a 07/01 para a cultura de milho, observa-se que, apesar de ter chovido (101,33 mm e 138,9 mm para feijão e milho, respectivamente), a variação de armazenamento na camada de 0-60 cm sempre foi negativa, ao passo que ela deveria ser positiva, pelo menos nos dias em que houve precipitação. No caso de se calcular o balanço hídrico nesse intervalo, haveria uma subestimativa da evapotranspiração. Nas fases iniciais das duas culturas, houve uma superestimativa da evapotranspiração porque o sistema radicular das culturas ocupa as primeiras camadas do solo, retira pouca quantidade de água e houve grande entrada de água no solo via precipitação ou irrigação. Além disso, a baixa condutividade hidráulica das camadas superficiais e a alta capacidade de armazenamento de água do solo, provocando baixa drenagem de água a 45 cm (1.ª camada a ser calculada a drenagem profunda) e valores de variação de armazenamento pequenos, até negativos (devido a drenagem do excedente hídrico) (Figuras 22 e 23) também são causas desta superestimativa.

O erro no cálculo da variação de armazenamento nos primeiros dias de desenvolvimento da cultura em que o sistema radicular não retira água abaixo de 22,5 cm é aproximadamente de:

supondo  $\theta_{cc(30)} \approx \theta_{cc(0-22,5)} = 44,5\%$  (Tabela 11) e que inicial-

mente o solo estivesse a uma tensão de  $(-\psi_m) = 1 \cdot 10^{-1}$  MPa  $\rightarrow \theta_{15\text{cm}}$  (Tabela 3) = 30,9%. Portanto:

$$\Delta A = (\theta_{cc} - \theta_{10^{-1}}) \times 22,5 \times 10 = \text{mm } \bar{\text{á}}\text{gua}$$

$$\Delta A = (0,445 - 0,309) \times 225$$

$$\Delta A = 30,6 \text{ mm } \bar{\text{á}}\text{gua}$$

Portanto, há uma superestimativa de 30,6 mm de  $\bar{\text{á}}\text{gua}$  na fase inicial de desenvolvimento das culturas de feijão e milho.

O erro no cálculo no caso de baixa precipitação, em que as plantas esgotam a  $\bar{\text{á}}\text{gua}$  disponível nas camadas superiores para depois retirarem em profundidade e que subestima a determinação é a seguinte:

Para a camada de 0-22,5 cm:

$$\theta_{cc} = 44,5$$

$$\theta_{PMP} = 26,91 \quad (\text{Tabela 3})$$

$$AD = (0,445 - 0,2691) \times 22,5 \times 10$$

$$AD = 44 \text{ mm de } \bar{\text{á}}\text{gua}$$

Para as culturas de milho e feijão ter-se-ia uma subestimativa de 21,99 mm de  $\bar{\text{á}}\text{gua}$ .

Para que os efeitos do estresse hídrico prejudiquem as fases finais de desenvolvimento das culturas (enchimento de grãos e maturação), cerca de 50% da  $\bar{\text{á}}\text{gua}$  disponível do solo já deve ter sido retirada (HALTERLEIN, 1983; WALDREN, 1983).

Na Tabela 14 estão os dados de evapotranspiração acumulada (desvio padrão) nas quatro fases de desenvolvimento das culturas de feijão e milho (Figuras 24 e 25). Os valores de evapotranspiração foram calculados a partir das Tabelas 12 e 13.

Mais de 90% da evapotranspiração calculada está contida na camada de 0-60 cm, tanto para a cultura de feijão como pa-



TABELA 12 - Balanço hídrico da cultura de feijão (Phaseolus vulgaris L.), cultivar carioca - 1º período.

| Prof.<br>(cm) | Rep. | P + I  | $\Delta A$ | $q_L$  | ET     | $\overline{ET}$ |
|---------------|------|--------|------------|--------|--------|-----------------|
|               |      | mm     | mm         | mm     | mm     | mm/dia          |
| 45            | 1    | 181,70 | -7,48      | -28,24 | 160,94 | 4,60            |
|               | 2    |        | -6,74      | -25,09 | 163,35 | 4,67            |
|               | 3    |        | -5,34      | -26,35 | 160,69 | 4,59            |
| 60            | 1    |        | -11,22     | -10,85 | 182,07 | 5,20            |
|               | 2    |        | -9,90      | -1,20  | 190,40 | 5,44            |
|               | 3    |        | -8,62      | -7,57  | 182,75 | 5,22            |
| 75            | 1    |        | -13,95     | -8,51  | 187,14 | 5,35            |
|               | 2    |        | -12,04     | -4,40  | 189,34 | 5,41            |
|               | 3    |        | -11,02     | -10,44 | 182,28 | 5,21            |
| 90            | 1    |        | -17,47     | -11,38 | 187,79 | 5,37            |
|               | 2    |        | -16,32     | -13,50 | 184,52 | 5,27            |
|               | 3    |        | -14,37     | -9,59  | 186,48 | 5,33            |
| 105           | 1    |        | -20,49     | -17,80 | 184,35 | 5,27            |
|               | 2    |        | -19,11     | -5,02  | 195,79 | 5,59            |
|               | 3    |        | -17,13     | -16,76 | 182,07 | 5,20            |
| 120           | 1    |        | -23,51     | -16,55 | 188,66 | 5,39            |
|               | 2    |        | -21,71     | -18,13 | 185,28 | 5,29            |
|               | 3    |        | -19,91     | -19,46 | 182,15 | 5,20            |
| 135           | 1    |        | -26,76     | -1,20  | 207,26 | 5,92            |
|               | 2    |        | -14,82     | -2,40  | 194,12 | 5,55            |
|               | 3    |        | -22,77     | -7,40  | 197,07 | 5,63            |

(continua)

TABELA 12 - Balanço hídrico da cultura de feijão (Phaseolus vulgaris L.), cultivar carioca - 2º período (19/05-07/06).

| Prof.<br>(cm) | Rep. | $P + I$ | $\Delta A$ | $q_L$ | ET     | $\bar{ET}$ |
|---------------|------|---------|------------|-------|--------|------------|
|               |      | mm      | mm         | mm    | mm     | mm/dia     |
| 45            | 1    | 118,09  | 12,15      | -3,24 | 102,70 | 5,14       |
|               | 2    |         | 9,83       | -0,32 | 107,94 | 5,40       |
|               | 3    |         | 11,90      | -3,54 | 102,65 | 5,13       |
| 60            | 1    |         | 18,54      | -3,85 | 95,70  | 4,79       |
|               | 2    |         | 14,05      | -0,02 | 104,02 | 5,20       |
|               | 3    |         | 15,91      | -4,10 | 98,02  | 4,90       |
| 75            | 1    |         | 15,76      | -0,40 | 101,93 | 5,10       |
|               | 2    |         | 1,61       | -0,45 | 116,03 | 5,80       |
|               | 3    |         | 15,50      | -0,31 | 102,28 | 5,11       |
| 90            | 1    |         | 13,22      | -1,31 | 103,56 | 5,18       |
|               | 2    |         | 2,86       | -1,40 | 113,86 | 5,69       |
|               | 3    |         | 15,63      | -0,71 | 101,75 | 5,09       |
| 105           | 1    |         | 11,94      | -0,54 | 105,61 | 5,28       |
|               | 2    |         | 1,74       | -0,61 | 115,74 | 5,79       |
|               | 3    |         | 14,52      | -1,16 | 102,41 | 5,12       |
| 120           | 1    |         | 10,14      | -1,09 | 106,86 | 5,34       |
|               | 2    |         | 1,74       | -2,95 | 113,40 | 5,67       |
|               | 3    |         | 13,51      | -1,10 | 103,48 | 5,17       |
| 135           | 1    |         | 7,90       | -0,25 | 109,94 | 5,50       |
|               | 2    |         | 12,65      | -0,45 | 104,99 | 5,25       |
|               | 3    |         | 11,64      | -0,53 | 105,92 | 5,30       |

(continua)

TABELA 12 - Balanço hídrico da cultura de feijão (Phaseolus vulgaris L.), cultivar carioca - 3º período (08/06-27/06).

| Prof.<br>(cm) | Rep. | P + I | $\Delta A$ | $q_L$  | ET    | $\overline{ET}$ |
|---------------|------|-------|------------|--------|-------|-----------------|
|               |      | mm    | mm         | mm     | mm    | mm/dia          |
| 45            | 1    | 20,9  | -7,97      | -19,88 | 8,99  | 0,45            |
|               | 2    |       | -6,97      | -13,14 | 14,73 | 0,74            |
|               | 3    |       | -7,86      | -17,00 | 11,76 | 0,59            |
| 60            | 1    |       | -12,29     | -19,90 | 13,29 | 0,66            |
|               | 2    |       | 4,58       | -0,55  | 15,77 | 0,79            |
|               | 3    |       | -11,46     | -8,35  | 24,01 | 1,20            |
| 75            | 1    |       | -8,54      | -1,29  | 28,15 | 1,41            |
|               | 2    |       | 4,29       | -2,82  | 13,79 | 0,69            |
|               | 3    |       | -9,90      | -3,47  | 27,33 | 1,37            |
| 90            | 1    |       | -5,35      | -1,67  | 24,58 | 1,23            |
|               | 2    |       | 4,52       | -1,72  | 14,66 | 0,73            |
|               | 3    |       | -8,79      | -2,99  | 26,70 | 1,34            |
| 105           | 1    |       | -3,66      | -4,19  | 20,37 | 1,02            |
|               | 2    |       | 6,08       | -1,96  | 12,86 | 0,64            |
|               | 3    |       | -7,12      | -5,64  | 22,38 | 1,12            |
| 120           | 1    |       | -2,19      | -4,12  | 18,97 | 0,95            |
|               | 2    |       | 7,03       | +3,40  | 17,27 | 0,86            |
|               | 3    |       | -5,65      | -4,86  | 21,69 | 1,08            |
| 135           | 1    |       | -1,43      | -0,20  | 22,13 | 1,11            |
|               | 2    |       | -6,81      | -1,02  | 26,69 | 1,33            |
|               | 3    |       | -2,51      | -1,93  | 21,48 | 1,07            |

(continua)

TABELA 12 - Balanço hídrico da cultura de feijão (Phaseolus vulgaris L.), cultivar carioca - 4º período (28/06-08/07).

| Prof.<br>(cm) | Rep. | $\frac{P + I}{\text{mm}}$ | $\frac{\Delta A}{\text{mm}}$ | $\frac{q_L}{\text{mm}}$ | $\frac{ET}{\text{mm}}$ | $\frac{\overline{ET}}{\text{mm/dia}}$ |
|---------------|------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 45            | 1    | 0,0                       | -3,02                        | -3,00                   | 0,02                   | 0,00                                  |
|               | 2    |                           | -2,93                        | -1,13                   | 1,80                   | 0,18                                  |
|               | 3    |                           | -9,33                        | -2,33                   | 7,00                   | 0,70                                  |
| 60            | 1    |                           | -4,08                        | -0,87                   | 3,21                   | 0,32                                  |
|               | 2    |                           | -3,68                        | -0,30                   | 3,38                   | 0,38                                  |
|               | 3    |                           | -4,03                        | -0,59                   | 3,44                   | 0,34                                  |
| 75            | 1    |                           | -4,36                        | -1,22                   | 3,14                   | 0,31                                  |
|               | 2    |                           | -4,95                        | -0,48                   | 4,47                   | 0,45                                  |
|               | 3    |                           | -4,67                        | -1,60                   | 3,07                   | 0,31                                  |
| 90            | 1    |                           | -4,78                        | -1,88                   | 2,90                   | 0,29                                  |
|               | 2    |                           | -6,16                        | -2,57                   | 3,59                   | 0,36                                  |
|               | 3    |                           | -5,53                        | -1,67                   | 3,86                   | 0,39                                  |
| 105           | 1    |                           | -5,06                        | -2,77                   | 2,29                   | 0,23                                  |
|               | 2    |                           | -6,63                        | -1,02                   | 5,61                   | 0,56                                  |
|               | 3    |                           | -5,59                        | -2,18                   | 3,41                   | 0,34                                  |
| 120           | 1    |                           | -4,92                        | -1,00                   | 3,92                   | 0,39                                  |
|               | 2    |                           | -7,34                        | -0,22                   | 7,12                   | 0,71                                  |
|               | 3    |                           | -6,37                        | -1,47                   | 4,90                   | 0,49                                  |
| 135           | 1    |                           | -4,43                        | -0,20                   | 4,23                   | 0,42                                  |
|               | 2    |                           | -8,20                        | -0,52                   | 7,68                   | 0,77                                  |
|               | 3    |                           | -8,03                        | -1,23                   | 6,80                   | 0,68                                  |

TABELA 13 - Balanço hídrico da cultura de milho (Zea mays L.), cultivar Cartill-501x - 1º período (09/11-02/01).

| Prof.<br>(cm) | Rep. | $\frac{P + I}{\text{mm}}$ | $\frac{\Delta A}{\text{mm}}$ | $\frac{q_L}{\text{mm}}$ | $\frac{ET}{\text{mm}}$ | $\frac{\overline{ET}}{\text{mm/dia}}$ |
|---------------|------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 45            | 1    | 313,90                    | -29,43                       | -22,65                  | 320,68                 | 5,83                                  |
|               | 2    |                           | -30,39                       | -56,85                  | 287,44                 | 5,23                                  |
|               | 3    |                           | -29,89                       | -28,63                  | 315,16                 | 5,73                                  |
| 60            | 1    |                           | -38,25                       | -0,12                   | 352,03                 | 6,40                                  |
|               | 2    |                           | -40,29                       | -1,47                   | 352,72                 | 6,41                                  |
|               | 3    |                           | -38,22                       | -29,27                  | 322,85                 | 5,87                                  |
| 75            | 1    |                           | -46,09                       | -12,64                  | 357,35                 | 6,50                                  |
|               | 2    |                           | -47,07                       | -14,92                  | 346,05                 | 6,29                                  |
|               | 3    |                           | -43,96                       | -40,42                  | 317,44                 | 5,77                                  |
| 90            | 1    |                           | -54,06                       | -9,86                   | 358,10                 | 6,51                                  |
|               | 2    |                           | -56,57                       | -43,65                  | 326,82                 | 5,94                                  |
|               | 3    |                           | -53,46                       | -5,36                   | 362,00                 | 6,58                                  |
| 105           | 1    |                           | -61,57                       | -1,32                   | 374,15                 | 6,80                                  |
|               | 2    |                           | -62,94                       | -10,80                  | 366,04                 | 6,66                                  |
|               | 3    |                           | -58,19                       | -52,97                  | 319,12                 | 5,80                                  |
| 120           | 1    |                           | -68,59                       | -15,94                  | 366,55                 | 6,66                                  |
|               | 2    |                           | -64,09                       | -46,31                  | 331,68                 | 6,03                                  |
|               | 3    |                           | -66,59                       | -12,49                  | 368,00                 | 6,69                                  |
| 135           | 1    |                           | -75,41                       | -52,82                  | 336,49                 | 6,12                                  |
|               | 2    |                           | -70,82                       | -22,63                  | 362,09                 | 6,58                                  |
|               | 3    |                           | -73,78                       | -8,15                   | 379,53                 | 6,90                                  |

(continua)

TABELA 13 - Balanço hídrico da cultura de milho (Zea mays L.), cultivar Cargill-501x - 2º período (03/01-20/01).

| Prof.<br>(cm) | Rep. | P     | $\Delta A$ | $q_L$  | ET     | $\overline{ET}$ |
|---------------|------|-------|------------|--------|--------|-----------------|
|               |      | mm    | mm         | mm     | mm     | mm/dia          |
| 45            | 1    | 180,6 | 23,67      | -47,37 | 109,56 | 6,44            |
|               | 2    |       | 22,50      | -59,29 | 98,81  | 5,81            |
|               | 3    |       | 23,22      | -14,04 | 143,34 | 8,43            |
| 60            | 1    |       | 29,55      | -0,02  | 151,03 | 8,88            |
|               | 2    |       | 29,47      | -0,19  | 150,94 | 8,88            |
|               | 3    |       | 29,57      | -14,50 | 136,53 | 8,03            |
| 75            | 1    |       | 35,46      | -0,46  | 144,68 | 8,51            |
|               | 2    |       | 34,70      | -7,79  | 138,11 | 8,12            |
|               | 3    |       | 34,01      | -9,62  | 136,97 | 8,06            |
| 90            | 1    |       | 42,33      | -1,58  | 136,69 | 8,04            |
|               | 2    |       | 41,41      | -5,75  | 133,45 | 7,85            |
|               | 3    |       | 40,09      | -0,92  | 139,59 | 8,21            |
| 105           | 1    |       | 46,32      | -0,26  | 134,02 | 7,88            |
|               | 2    |       | 44,96      | -2,03  | 133,61 | 7,86            |
|               | 3    |       | 44,21      | -7,75  | 128,64 | 7,57            |
| 120           | 1    |       | 50,20      | -1,98  | 128,42 | 7,55            |
|               | 2    |       | 47,69      | -6,46  | 126,45 | 7,44            |
|               | 3    |       | 48,81      | -0,53  | 131,26 | 7,72            |
| 135           | 1    |       | 53,18      | -3,21  | 124,21 | 7,31            |
|               | 2    |       | 51,27      | -1,37  | 127,96 | 7,53            |
|               | 3    |       | 53,40      | -0,29  | 126,91 | 7,47            |

(continua)

TABELA 13 - Balanço hídrico da cultura de milho (Zea mays L.), cultivar Cargill-501x - 3º período (21/01-07/03).

| Prof.<br>(cm) | Rep. | P<br>mm | $\Delta A$<br>mm | $q_L$<br>mm | ET<br>mm | $\overline{ET}$<br>mm/dia |
|---------------|------|---------|------------------|-------------|----------|---------------------------|
| 45            | 1    | 277,2   | 2,48             | -55,20      | 219,52   | 4,99                      |
|               | 2    |         | 4,19             | -100,89     | 172,12   | 3,91                      |
|               | 3    |         | 4,34             | -54,30      | 218,56   | 4,97                      |
| 60            | 1    |         | -2,17            | -0,21       | 279,16   | 6,34                      |
|               | 2    |         | 3,53             | -0,70       | 272,97   | 6,20                      |
|               | 3    |         | 4,93             | -19,93      | 252,34   | 5,74                      |
| 75            | 1    |         | -2,80            | -1,31       | 278,69   | 6,33                      |
|               | 2    |         | 0,57             | -1,36       | 275,27   | 6,26                      |
|               | 3    |         | 0,05             | -7,16       | 269,99   | 6,14                      |
| 90            | 1    |         | -7,50            | -1,64       | 283,06   | 6,43                      |
|               | 2    |         | -2,64            | -9,99       | 269,85   | 6,13                      |
|               | 3    |         | 4,15             | -0,90       | 272,15   | 6,19                      |
| 105           | 1    |         | -10,62           | -0,15       | 287,67   | 6,54                      |
|               | 2    |         | -4,98            | -0,92       | 281,26   | 6,39                      |
|               | 3    |         | -6,78            | -4,89       | 279,09   | 6,34                      |
| 120           | 1    |         | -14,18           | -0,32       | 291,06   | 6,62                      |
|               | 2    |         | -9,34            | -0,98       | 285,56   | 6,49                      |
|               | 3    |         | 0,59             | -1,13       | 275,48   | 6,28                      |
| 135           | 1    |         | -17,88           | -2,18       | 292,90   | 6,66                      |
|               | 2    |         | -12,55           | -0,29       | 287,78   | 6,54                      |
|               | 3    |         | -1,92            | -1,97       | 278,83   | 6,34                      |

(continua)

TABELA 13 - Balanço hídrico da cultura de milho (*Zea mays* L.), cultivar Cargill-501x - 4º período (08/03-19/03).

| Prof.<br>(cm) | Rep. | P    | $\Delta A$ | $q_L$  | ET    | $\overline{ET}$ |
|---------------|------|------|------------|--------|-------|-----------------|
|               |      | mm   | mm         | mm     | mm    | mm/dia          |
| 45            | 1    | 73,9 | 5,38       | -36,48 | 32,04 | 2,67            |
|               | 2    |      | 5,35       | -23,45 | 45,10 | 3,76            |
|               | 3    |      | 3,62       | -12,39 | 57,89 | 4,82            |
| 60            | 1    |      | 12,24      | -0,01  | 61,65 | 5,14            |
|               | 2    |      | 8,42       | -0,85  | 64,63 | 5,39            |
|               | 3    |      | 4,88       | -15,09 | 53,93 | 4,49            |
| 75            | 1    |      | 14,24      | -0,35  | 59,31 | 4,94            |
|               | 2    |      | 12,62      | -0,85  | 60,43 | 5,04            |
|               | 3    |      | 12,09      | -4,31  | 57,50 | 4,79            |
| 90            | 1    |      | 16,64      | -0,38  | 56,88 | 4,74            |
|               | 2    |      | 17,32      | -2,31  | 54,27 | 4,52            |
|               | 3    |      | 10,02      | -0,48  | 63,40 | 5,28            |
| 105           | 1    |      | 20,23      | -0,01  | 53,66 | 4,47            |
|               | 2    |      | 20,66      | -0,77  | 52,47 | 4,37            |
|               | 3    |      | 19,74      | -1,80  | 52,36 | 4,36            |
| 120           | 1    |      | 22,44      | -0,24  | 51,22 | 4,27            |
|               | 2    |      | 22,54      | -0,66  | 56,02 | 4,23            |
|               | 3    |      | 17,17      | -0,71  | 50,70 | 4,67            |
| 135           | 1    |      | 23,97      | -0,53  | 49,40 | 4,12            |
|               | 2    |      | 25,95      | -0,78  | 51,75 | 4,29            |
|               | 3    |      | 21,57      | -0,58  | 47,17 | 4,31            |



TABELA 14 - Evapotranspiração acumulada (ET) da cultura de milho (Z a mays L.) cultivar Cargill-501x, e feijão (Phaseolus vulgaris L.) cultivar carioca, nas diversas profundidades.

| Prof.<br>(cm) | Rep. | ET (mm)           |                  |
|---------------|------|-------------------|------------------|
|               |      | Cultura de Feijão | Cultura de Milho |
| 45            | 1    | 272,65            | 681,80           |
|               | 2    | 287,82            | 603,47           |
|               | 3    | 282,10            | 735,95           |
|               | x    | 280,86(7,66)      | 673,41(66,14)    |
| 60            | 1    | 294,27            | 843,87           |
|               | 2    | 313,57            | 841,26           |
|               | 3    | 308,28            | 765,65           |
|               | x    | 305,37(9,97)      | 816,93(44,43)    |
| 75            | 1    | 320,36            | 840,03           |
|               | 2    | 323,63            | 819,86           |
|               | 3    | 314,96            | 781,90           |
|               | x    | 319,63(4,35)      | 813,93(29,52)    |
| 90            | 1    | 318,83            | 834,73           |
|               | 2    | 316,63            | 784,39           |
|               | 3    | 318,79            | 837,14           |
|               | x    | 318,08(1,26)      | 818,75(29,78)    |
| 105           | 1    | 312,62            | 849,50           |
|               | 2    | 330,00            | 833,38           |
|               | 3    | 310,27            | 779,21           |
|               | x    | 317,63(10,78)     | 820,70(36,82)    |
| 120           | 1    | 318,41            | 837,25           |
|               | 2    | 314,02            | 830,76           |
|               | 3    | 312,22            | 794,39           |
|               | x    | 314,88(3,18)      | 820,80(23,10)    |
| 135           | 1    | 343,56            | 803,00           |
|               | 2    | 333,48            | 837,02           |
|               | 3    | 331,27            | 825,00           |
|               | x    | 336,10(6,55)      | 821,67(17,25)    |

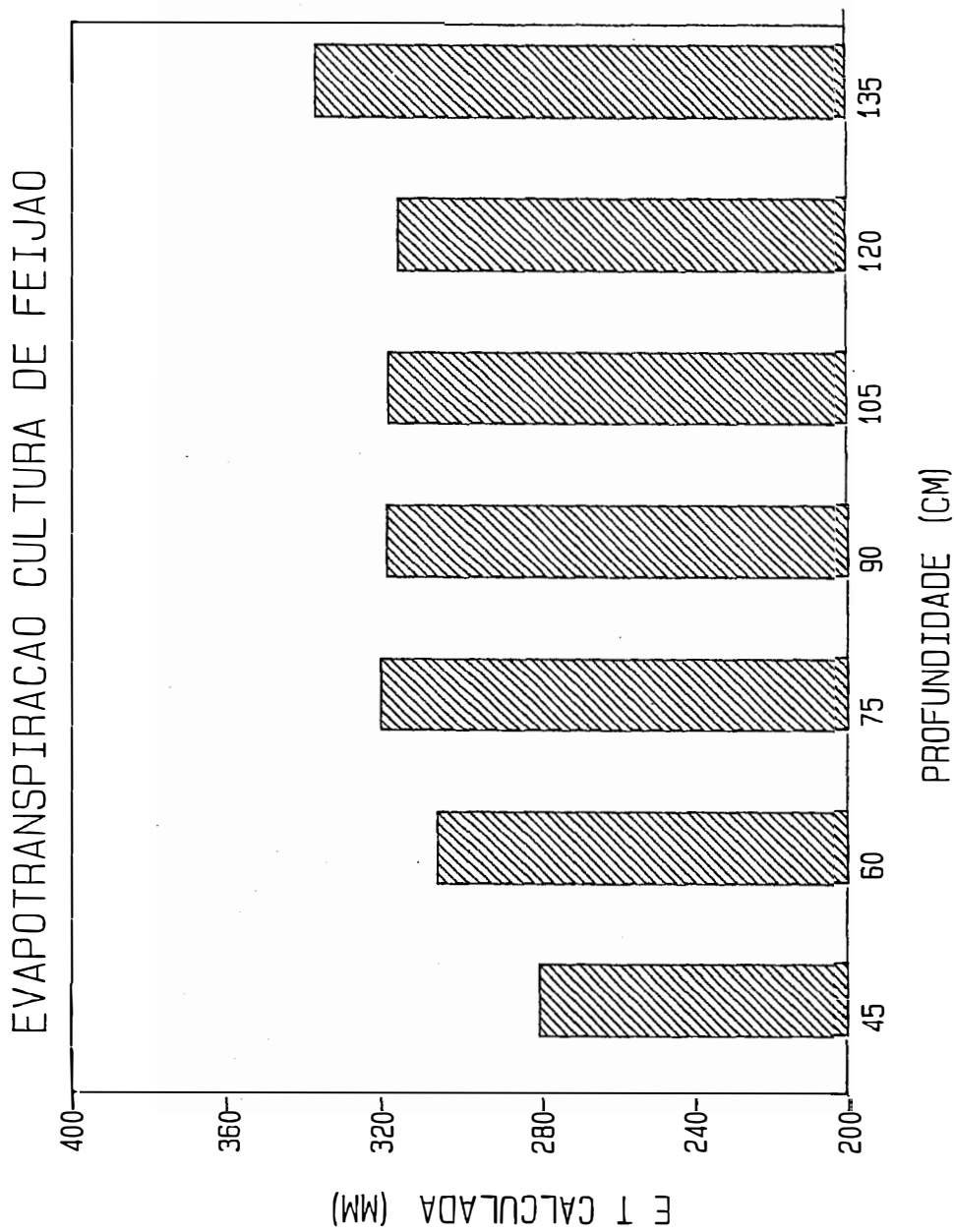


FIGURA 24 - Evapotranspiração acumulada da cultura de feijão (Phaseolus vulgaris L.) cultivar carioca.

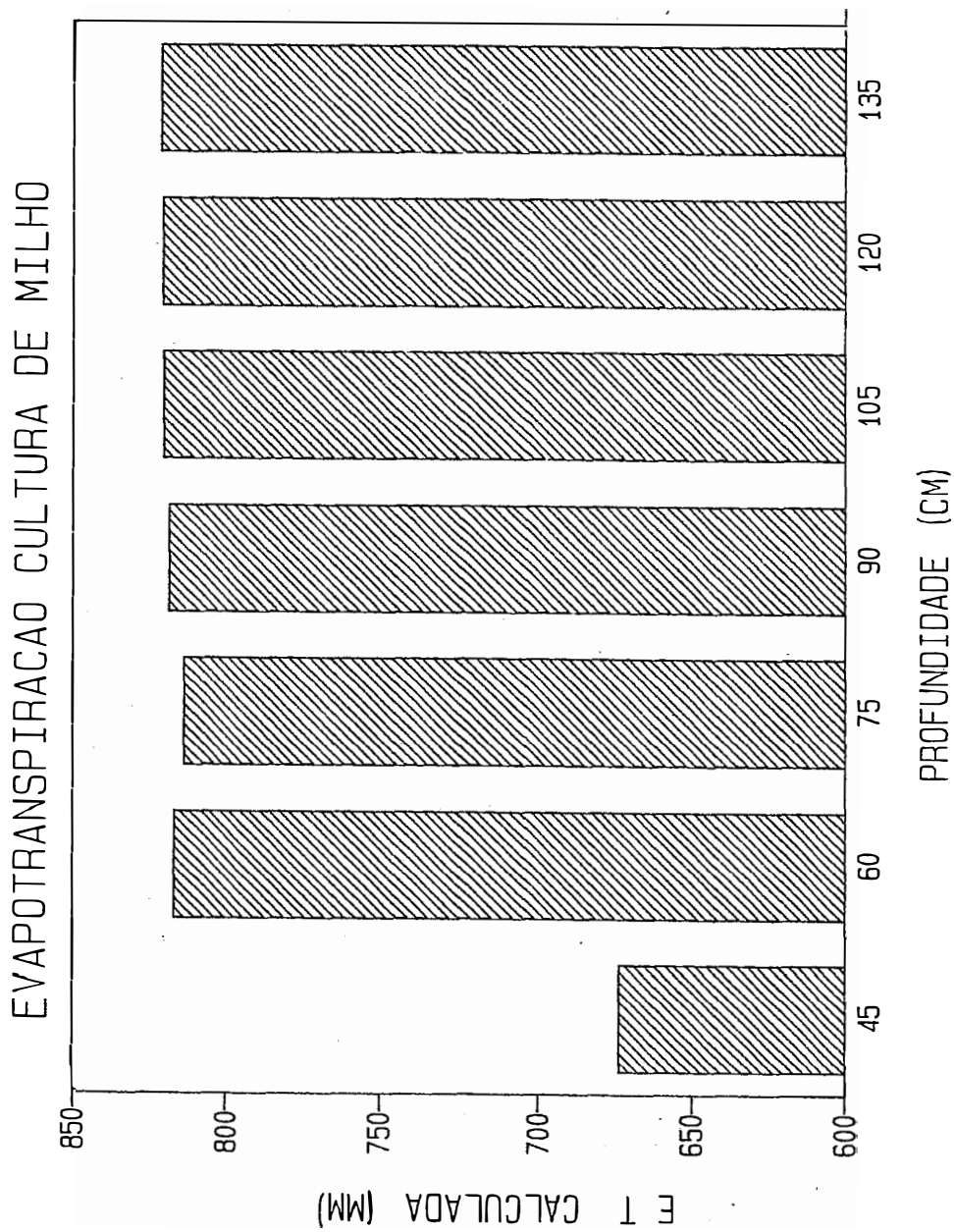


FIGURA 25 - Evapotranspiração acumulada da cultura de milho (Zea mays L.) cultivar Cargill-501.

ra o milho. A profundidade de 60 cm é, portanto, o limite inferior no solo do balanço hídrico. Na Tabela 15 (Figuras 26 e 27) estão os valores de evapotranspiração média nas diversas fases de desenvolvimento das culturas de feijão e milho e os valores médios da evaporação do tanque Classe A corrigidos ( $K_p = 0,75$ ) e a evapotranspiração potencial calculada pelo método de PENMAN (1948), descrito em OMETTO (1981). Como se pode observar, o valor da evapotranspiração média calculada pelo método do balanço hídrico foi sempre superior ao de evaporação (corrigida) do Tanque Classe A e da evapotranspiração calculada por PENMAN (1948). Na cultura de feijão, a evapotranspiração foi maior que a evaporação média do tanque Classe A e ET/Penman na primeira e segunda fase, e menor na terceira e na quarta fase de desenvolvimento da cultura.

Segundo DOORENBOS e PRUITT (1979), os coeficientes de cultura para feijão são 0,3-0,4; 0,7-0,8; 1,05-1,2; 0,65-0,75 nas quatro fases de desenvolvimento da cultura. A partir da Tabela 15, estes coeficientes calculados pelo método do balanço hídrico são: 1,7; 1,83; 0,5 e 0,1, respectivamente. Introduzindo a superestimativa e subestimativa da evapotranspiração anteriormente discutida, corrige-se os coeficientes da cultura de feijão para 1,35; 1,27; 1,07 e 0,83 (Tabela 16).

Os valores de  $K_c$  corrigidos pela variação de armazenamento aproximam-se dos valores da FAO, principalmente no terceiro e no quarto período. O primeiro e o segundo período continuam superestimados, indicando que, nestes períodos, deflúvio superficial deve ter ocorrido e não foi contabilizado.

TABELA 15 - Evapotranspiração média calculada pelo método do balanço hídrico, Tanque Classe A e PENMAN (1948) modificado, em diferentes períodos de desenvolvimento das culturas de milho (Zea mays L.) cultivar Cargill-501x, e de feijão (Phaseolus vulgaris L.) cultivar carioca.

---

 FEIJÃO
 

---

| Método         | Fases     |          |          |          | Total |
|----------------|-----------|----------|----------|----------|-------|
|                | 13/4-18/5 | 19/5-7/6 | 8/6-27/6 | 28/6-8/7 |       |
| Bal. Hídr.*    | 5,19      | 4,96     | 0,88     | 0,35     | 3,55  |
| Classe A Corr. | 3,09      | 2,71     | 1,85     | 3,04     | 2,77  |
| Penman         | 2,82      | 2,31     | 1,74     | 2,34     | 2,38  |

---



---

 MILHO
 

---

| Método         | Fases    |          |          |          | Total |
|----------------|----------|----------|----------|----------|-------|
|                | 9/11-2/1 | 3/1-20/1 | 21/1-7/3 | 8/3-19/3 |       |
| Bal. Hídr.*    | 6,23     | 8,60     | 6,09     | 5,01     | 6,28  |
| Classe A Corr. | 4,94     | 5,33     | 4,41     | 2,96     | 4,69  |
| Penman         | 4,59     | 4,73     | 4,40     | 3,19     | 4,39  |

---

\*Profundidade considerada = 60 cm

$$K_p = 0,75$$

# EVAPOTRANSPIRACAO CULTURA DE FEIJAO

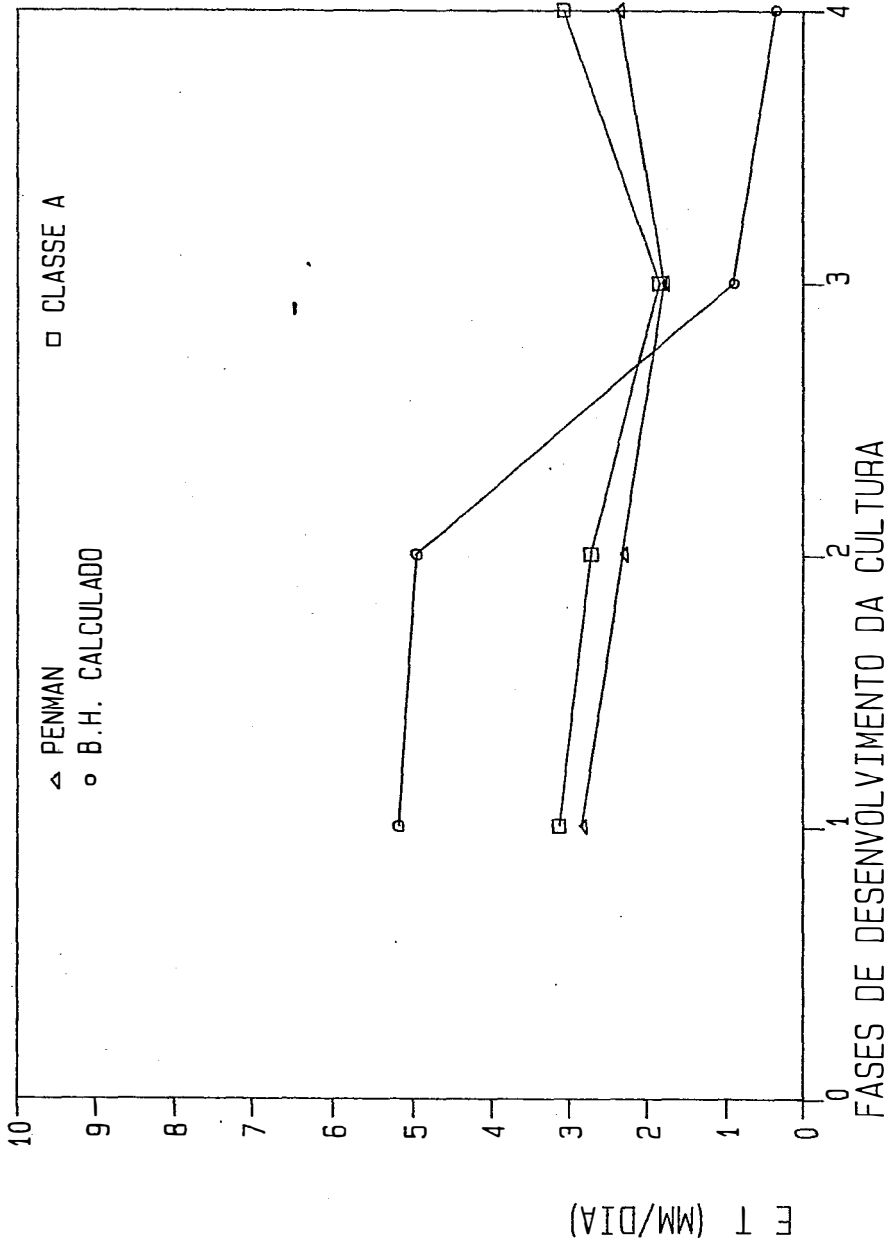


FIGURA 26a - Evapotranspiração média da cultura de feijão, calculada pelo método do balanço hídrico, tanque Classe A (corrigido) e PENMAN (1948).

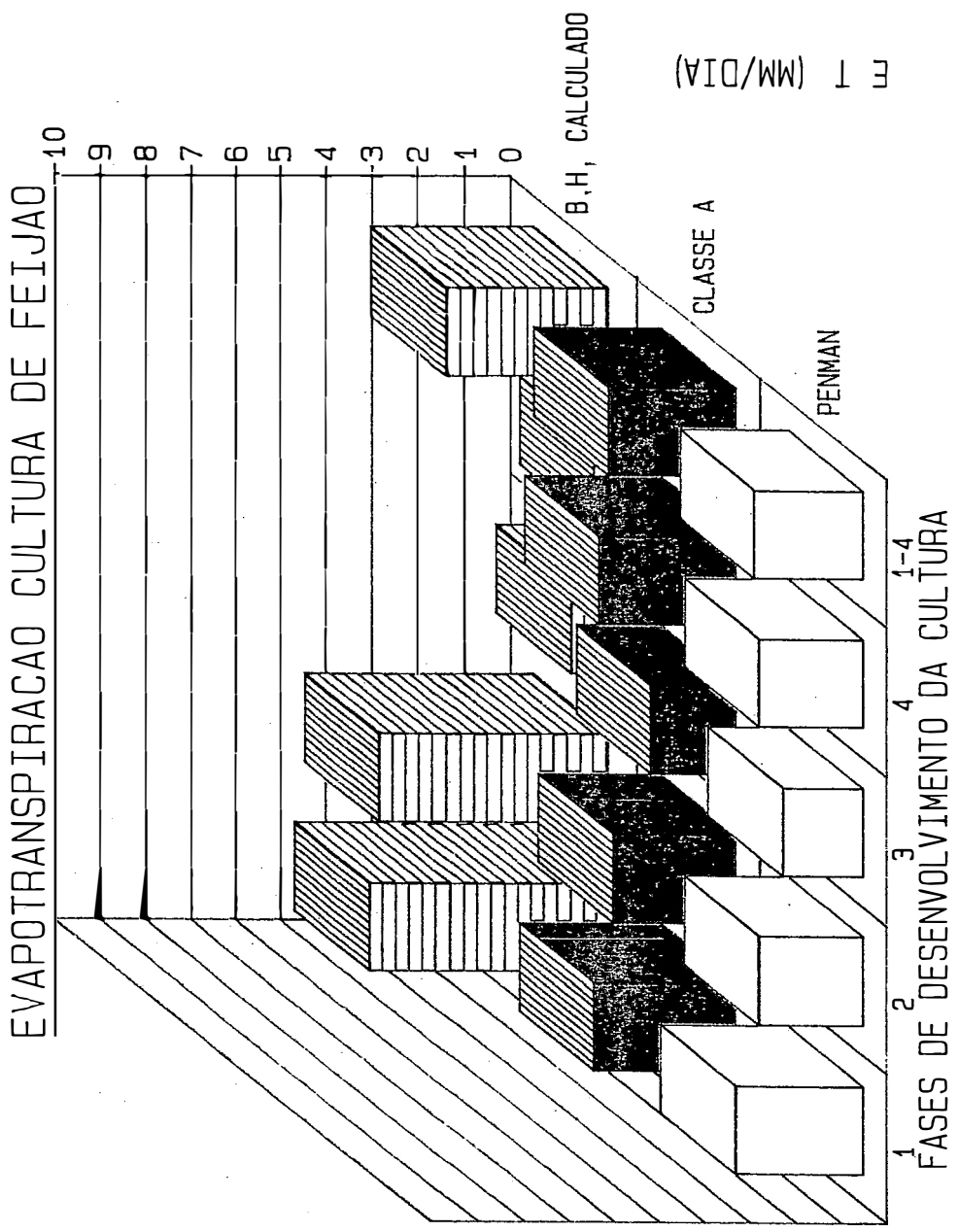


FIGURA 26b - Evapotranspiração média da cultura de feijão, calculada pelo método do balanço hídrico, tanque Classe A (corrigido) e PENMAN (1948).

# EVAPOTRANSPIRACAO CULTURA DE MILHO

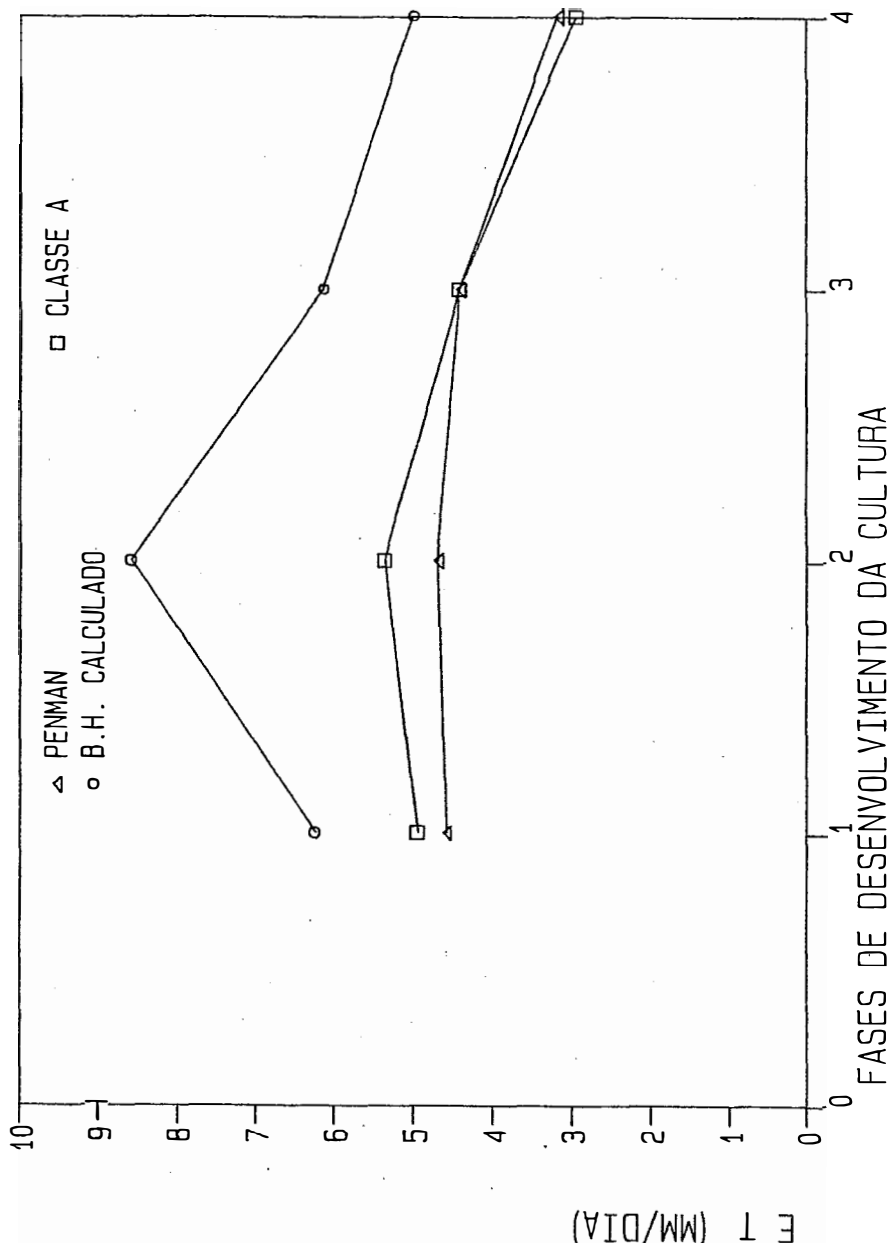


FIGURA 27a - Evapotranspiração média da cultura de milho, calculada pelo método do balanço hídrico, tanque Classe A e PENMAN (1948).



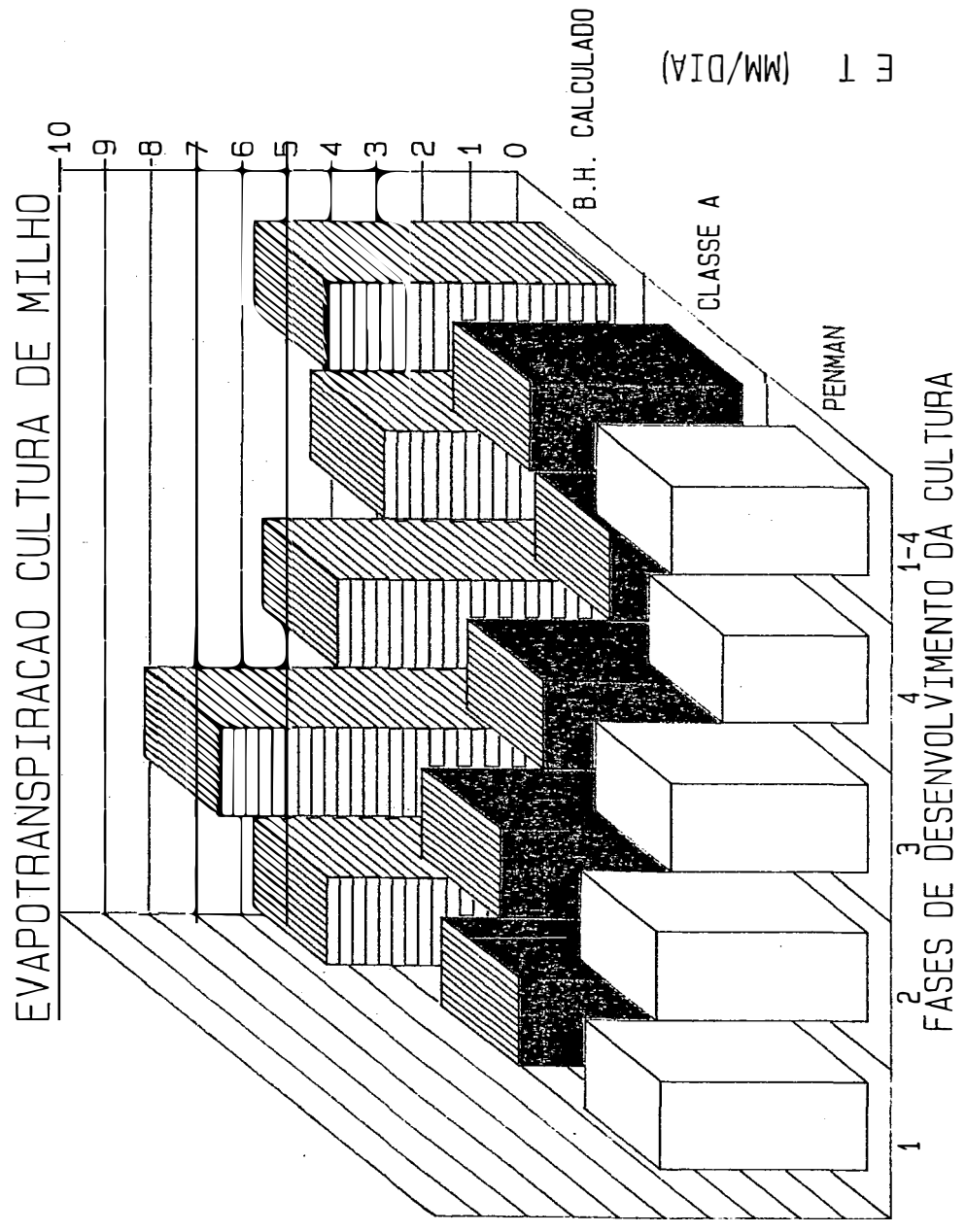


FIGURA 27b - Evapotranspiração média da cultura de milho, calculada pelo método do balanço hídrico, tanque Classe A e PENMAN (1948).

TABELA 16 - Correção dos valores de evapotranspiração da cultura de feijão.

| PERÍODO | ET CALC | ΔA CORR | ET CORR | $\bar{ET}$ | ET/ECA                         | ET/ETP              |
|---------|---------|---------|---------|------------|--------------------------------|---------------------|
| 1       | 185,07  | +30,6   | 154,47  | 4,29       | <i>1,35</i><br><del>1,39</del> | <i>1,54</i><br>1,52 |
| 2       | 99,25   | +30,6   | 68,65   | 3,43       | 1,27                           | 1,48                |
| 3       | 17,69   | -21,99  | 39,68   | 1,98       | 1,07                           | 1,14                |
| 4       | 3,34    | -21,99  | 25,33   | 2,53       | 0,83                           | 1,08                |

Os valores corrigidos de Kc nas fases finais de desenvolvimento da cultura de milho não diferem muito de outros encontrados na literatura.

Em condições semelhantes, REICHARDT et alii (1974) obteve para feijão a relação ET/ECA de 0,5 na fase inicial e 1,4 no pleno desenvolvimento da cultura e relação ET/ETP de 0,5 e 1,5 nas mesmas fases. ENCARNAÇÃO (1980) cultivou feijão em evapotranspirômetros e encontrou uma relação ET/ECA de 0,7 e 1,2 na fase inicial e floração e ET/ETP de 0,7 e 1,4 nas mesmas fases, respectivamente.

A evapotranspiração total calculada da cultura de feijão foi de 305,36 mm, num período de 86 dias, o que dá uma média de 3,55 mm/dia, dentro das estimativas de outros autores: GARRIDO e TEIXEIRA (1978) obtiveram 4,17 mm/dia; SILVEIRA e STONE (1979) obtiveram 2,94 mm/dia; GUIMARÃES et alii (1982), 1,96 - 2,14 mm/dia; GIRALT (1979), 3,47 mm/dia; GARRIDO et alii (1979), 4,77-5,11 mm/dia.

A evapotranspiração total corrigida da cultura de feijão seria de 288,13 mm, que daria uma média de 3,35 mm/dia, pouco diferente da ET calculada pelo balanço hídrico. A estimativa da ET calculada foi cerca de 6% maior que a ET corrigindo a variação de armazenamento.

A cultura de milho teve uma evapotranspiração média total de 816,92 mm, num ciclo de 140 dias, dando um valor médio de 6,28 mm/dia no período que foi elaborado o balanço hídrico da cultura no campo. A evapotranspiração média calculada foi 1,33 vezes o valor da evaporação do tanque Classe A corrigido e 1,43 vezes a ET calculada pelo método de PENMAN (1948) (Tabela 15), indicando que a variação de armazenamento determinou esta superestimativa, já

que choveu praticamente durante todo o ciclo da cultura e os valores da variação de armazenamento foram positivos ou pequenos na maior parte do desenvolvimento da cultura (Tabelas 13 e 14).

Da mesma forma que a cultura de feijão, a correção da ET da cultura está na Tabela 17.

Os valores de Kc corrigidos estão pouco acima dos valores da FAO (0,7-0,85; 1,05-1,2; 0,8-0,9; 0,55-0,6) mas, devido às condições experimentais (precipitação intensa e frequente), outros fatores, como o deflúvio superficial contribuíram também para esta superestimativa (BERGAMASCHI, 1984; ROUSE e WILSON, 1971/72).

A evapotranspiração total corrigida é 694,53 (Tabela 17), isto é, a evapotranspiração calculada é 15% maior que a corrigida.

#### 4.3.4. Drenagem profunda

Em trabalho de balanço hídrico realizado nas proximidades da área experimental, delimitou-se uma zona de máxima presença da zona radicular (PAULA SOUZA et alii, 1979; REICHARDT et alii, 1979), por exemplo, 120 cm ou 67,5 cm (BERGAMASCHI, 1984), não se observando a dinâmica da drenagem profunda e da armazenagem de água nas várias fases de desenvolvimento da cultura. O cálculo da drenagem profunda foi feito através de uma única equação, representando áreas experimentais grandes (BERGAMASCHI, 1984), desprezando a variabilidade espacial desta propriedade do solo (NIELSEN, 1973; REICHARDT et alii, 1976; CAVALCANTE et alii, 1978; SAUNDERS, 1978).

A influência da drenagem profunda tem sido frequen-

TABELA 17 - Correção da evapotranspiração para a cultura de milho.

| FASE | ET     | $\Delta A$ CORR | ET CORR | $\bar{ET}$ | ET/ECA | ET/ETP |
|------|--------|-----------------|---------|------------|--------|--------|
| 1    | 342,53 | +30,6           | 311,93  | 5,67       | 1,15   | 1,24   |
| 2    | 146,17 | +30,6           | 115,57  | 6,80       | 1,28   | 1,28   |
| 3    | 268,16 | +30,6           | 237,56  | 5,40       | 1,22   | 1,22   |
| 4    | 60,07  | +30,6           | 29,47   | 2,46       | 0,83   | 0,83   |

temente citada na literatura como um dos problemas do cálculo do balanço hídrico. VACHAUD et alii (1973) calcula que o valor da drenagem profunda seja da mesma ordem que a evapotranspiração. ROUSE e WILSON (1971/72), em cultura de milho, calcularam drenagem profunda de 9% da evapotranspiração total da cultura; SILVEIRA e STONE (1979), trabalhando com feijão em L.V.A. do cerrado em Brasília, encontraram valores de 40,15 mm de uma evapotranspiração calculada de 220,47 mm, portanto, 18%, tomando como limite para o desenvolvimento a profundidade de 60 cm; PAULA SOUZA et alii (1979), trabalhando com feijão, em área próxima a este experimento, na profundidade de 120 cm, encontraram valores de drenagem profunda da ordem 57,8% das perdas na época chuvosa do ensaio (janeiro/março).

Pode-se observar pelas Tabelas 12 e 13 a grande variabilidade dos valores de drenagem profunda entre as repetições na mesma profundidade e nas diferentes profundidades devido à utilização de uma função  $K(\theta)$  para cada repetição (Tabela 7).

As diferenças nos valores de drenagem em profundidade devem-se, principalmente, à variação da função  $K(\theta)$  anteriormente discutida. Para a cultura de feijão, a drenagem profunda teve uma tendência de ser maior na camada de 45 cm, caindo na camada de 60 cm e mantendo-se aproximadamente constante nas camadas inferiores. Isto se deve a maior atividade do sistema radicular da cultura estar concentrada nesta profundidade (DOORENBOS e KASSAN, 1979; GARRIDO et alii, 1978).

Nas Tabelas 18 e 19 estão os valores médios (de três repetições) dos componentes do balanço hídrico das culturas de feijão e milho, respectivamente, nas diversas fases de desenvolvimento nas profundidades de 45 e 60 cm, calculadas a partir das Tabelas 12 e 13.

As perdas por drenagem profunda das camadas de 45 e 60 cm foram de 15 e 6% da precipitação, ou 17 e 6% da estimativa da evapotranspiração calculada no período da cultura de feijão.

Para a cultura de milho, a drenagem profunda correspondeu a 20% da precipitação e 25% da evapotranspiração estimada na camada de 45 cm e 3% da precipitação e evapotranspiração na profundidade de 60 cm.

Nas Tabelas 20 e 21 estão os valores médios (desvio padrão) e o coeficiente de variação dos dados de drenagem profunda das culturas de feijão e milho, respectivamente.

Dentro das fases de desenvolvimento das culturas, a drenagem profunda teve uma variação de, no máximo, duas vezes o valor da média. Os valores do coeficiente de variação foram menores na cultura de feijão do que a de milho. Isto é devido à presença do sistema radicular do milho em profundidade (abaixo de 60 cm), ocasionando variações nas determinações da umidade volumétrica pelo tensiômetro. Na cultura de feijão, como a maior parte do seu sistema radicular se desenvolve superficialmente, a variação da drenagem profunda de menos de uma ordem de valor médio, nas profundidades abaixo de 60 cm, é devida aos coeficientes  $K_0$ ,  $\gamma$  e  $\theta_0$  das equações de condutividade de cada repetição, na mesma profundidade, como foi discutido no item "Condutividade hidráulica do solo".

TABELA 18 - Balanço hídrico da cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar darioca, em quatro fases de desenvolvimento. Valores são média de três repetições.

| Fase  | Prof. z = 45 cm. |          |                      |           | Prof. z = 60 cm |                      |           |           |
|-------|------------------|----------|----------------------|-----------|-----------------|----------------------|-----------|-----------|
|       | P<br>mm          | ΔA<br>mm | q <sub>L</sub><br>mm | ETP<br>mm | ΔA<br>mm        | q <sub>L</sub><br>mm | ETP<br>mm | ETP<br>mm |
| 1a.   | 181,70           | -6,52    | -26,56               | 161,66    | -9,91           | -6,54                | 185,07    |           |
| 2a.   | 118,09           | 11,29    | -2,37                | 104,43    | 16,17           | -2,66                | 99,27     |           |
| 3a.   | 20,90            | -7,60    | -16,67               | 11,83     | -6,39           | -9,60                | 17,69     |           |
| 4a.   | 0,00             | -5,09    | -2,15                | 2,94      | -3,93           | -0,59                | 3,34      |           |
| TOTAL | <u>320,69</u>    | -7,92    | -47,75               | 280,86    | -4,06           | -19,39               | 305,36    |           |



TABELA 19 - Balanço hídrico da cultura de milho (*Zea mays* L.) cultivar Cargill-501x, em quatro fases de desenvolvimento. Valores são média de três repetições.

| Fase  | Prof. z = 45 cm |                  |             |           | Prof. z = 60 cm |             |           |  |
|-------|-----------------|------------------|-------------|-----------|-----------------|-------------|-----------|--|
|       | P<br>mm         | $\Delta A$<br>mm | $q_L$<br>mm | ETP<br>mm | $\Delta$<br>mm  | $q_L$<br>mm | ETP<br>mm |  |
| 1a.   | 313,90          | -29,90           | -36,04      | 307,76    | -38,92          | -10,29      | 342,53    |  |
| 2a.   | 180,60          | 23,13            | -40,23      | 117,24    | 29,53           | -4,90       | 146,17    |  |
| 3a.   | 277,20          | 3,67             | -70,13      | 203,40    | 2,10            | -6,95       | 268,15    |  |
| 4a.   | 73,90           | 4,78             | -24,11      | 45,01     | 8,51            | -5,32       | 60,07     |  |
| TOTAL | 845,60          | 1,68             | 170,51      | 673,01    | 1,22            | -27,46      | 816,92    |  |

TABELA 20 - Valores médios (desvio padrão) de drenagem profunda ( $q_L = \text{mm}$ ) nas diversas profundidades e fases de desenvolvimento da cultura de feijão (Phaseolus vulgaris L.), cultivar carioca, calculados a partir da Tabela 12.

| Prof.<br>(cm) | Drenagem Profunda ( $q_L = \text{mm}$ ) |                   |                    |                   |                     |
|---------------|---|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
|               | 1a. fase                                | 2a. fase          | 3a. fase           | 4a. fase          | total               |
| 45<br>CV%     | -26,56(1,59)<br>6                       | -2,37(1,78)<br>75 | -16,67(3,38)<br>20 | -2,15(0,95)<br>44 | -47,75(4,25)<br>10  |
| 60<br>CV%     | -6,54(4,91)<br>75                       | -2,66(8,29)<br>86 | -9,60(9,74)<br>101 | -0,59(0,29)<br>49 | -19,39(11,15)<br>57 |
| 75<br>CV%     | -7,78(3,08)<br>40                       | -0,39(0,07)<br>18 | -2,53(1,12)<br>44  | -1,10(0,57)<br>52 | -11,80(3,33)<br>28  |
| 90<br>CV%     | -11,49(1,96)<br>17                      | -1,14(0,38)<br>33 | -2,13(0,75)<br>35  | -2,04(0,47)<br>23 | -16,80(2,18)<br>13  |
| 105<br>CV%    | -13,19(7,10)<br>54                      | -0,77(0,34)<br>44 | -3,93(1,85)<br>47  | -1,99(0,89)<br>45 | -19,88(7,40)<br>37  |
| 120<br>CV%    | -18,05(1,46)<br>8                       | -1,71(1,07)<br>63 | -1,86(4,57)<br>246 | -0,90(0,63)<br>70 | -22,52(4,96)<br>22  |
| 135<br>CV%    | -3,67(3,29)<br>90                       | -0,41(0,14)<br>35 | -1,05(0,87)<br>82  | -0,65(0,53)<br>81 | -5,78(3,45)<br>60   |

TABELA 21 - Valores médios (desvio padrão) de drenagem profunda ( $q_L$  = mm) nas diversas profundidades e fases de desenvolvimento da cultura de milho (Zea mays L.), cultivar Cargill-501x, calculados a partir da Tabela 13.

| Prof. (cm) | Drenagem Profunda ( $q_L$ = mm) |                     |                     |                     | total                |
|------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
|            | 1a. fase                        | 2a. fase            | 3a. fase            | 4a. fase            |                      |
| 45<br>CV%  | -36,04(18,27)<br>51             | -40,23(23,45)<br>58 | -70,13(26,64)<br>38 | -24,11(12,06)<br>50 | -170,51(41,68)<br>24 |
| 60<br>CV%  | -10,29(16,45)<br>160            | -4,90(8,31)<br>170  | -6,95(11,25)<br>162 | -5,32(8,47)<br>159  | -27,46(23,19)<br>84  |
| 75<br>CV%  | -22,66(15,42)<br>68             | -5,96(4,85)<br>81   | -3,28(3,36)<br>103  | -1,84(2,16)<br>117  | -33,74(16,65)<br>49  |
| 90<br>CV%  | -19,62(20,93)<br>107            | -2,75(2,62)<br>95   | -4,18(5,05)<br>121  | -1,06(1,09)<br>103  | -27,61(21,72)<br>79  |
| 105<br>CV% | -21,70(27,50)<br>127            | -3,35(3,91)<br>117  | -1,99(2,54)<br>128  | -0,86(0,90)<br>104  | -27,90(27,91)<br>100 |
| 120<br>CV% | -24,91(18,61)<br>75             | -2,99(3,09)<br>103  | -0,81(0,43)<br>53   | -0,54(0,26)<br>48   | -29,25(18,87)<br>65  |
| 135<br>CV% | -27,87(22,79)<br>82             | -1,62(1,48)<br>91   | -1,48(1,04)<br>70   | -0,63(0,13)<br>21   | -31,60(22,86)<br>72  |

#### 4.3.5. Eficiência de utilização de água

A produção de massa seca e grãos das culturas de milho e feijão (Kg/ha) estão nas Tabelas 22 e 23 e nas Figuras 28 e 29. A produção de grãos e massa seca foi alta, revelando que todos os componentes agrônômicos necessários ao manejo da cultura foram maximizados. A produção da cultura de feijão de 1487,92 Kg/ha está bem acima da média nacional de aproximadamente 500 Kg/ha, o mesmo acontecendo com o milho que produziu 8869,33 Kg/ha, sendo que a média nacional está em torno de 1700 Kg/ha (BRASIL, 1984).

A eficiência de utilização de água, parâmetro que exprime a capacidade da planta em reverter a água evapotranspirada em massa vegetal e grãos está na Tabela 24.

Apesar das estimativas da evapotranspiração estarem superestimadas da ordem de 15%, os valores de eficiência de utilização de água (EUA) das culturas estão dentro dos valores encontrados na literatura. DOORENBOS e PRUITT (1975) estimam que a EUA da cultura de feijão é da ordem de 0,3 a 0,6 Kg/m<sup>3</sup> contra 0,49 Kg/m<sup>3</sup> calculados para a cultura. Para a cultura de milho, a EUA é da ordem de 0,8 a 1,6 Kg/m<sup>3</sup> contra 1,09 Kg/m<sup>3</sup> calculado.

UNGES e STEWART (1983) encontraram na literatura valores da ordem de 79 - 523 Kg.ha.cm<sup>-1</sup> para a cultura de milho e OSUJI (1984), na África, num Oxic Paleudalf com a cultura de milho em diferentes sistemas de preparo do solo, encontrou valores de EUA da ordem de 76,34 - 118 Kg.ha.cm<sup>-1</sup> em plantio direto e 35,35 - 111,55 Kg.ha<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup> contra os 108,57 Kg.ha<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup> determinados neste experimento.

TABELA 22 - Valores dos rendimentos de matéria seca acumulos pelos diferentes órgãos da cultura de feijão (Phaseolus vulgaris L.), em cinco épocas de amostragem.

| Épocas<br>(dag)   | Órgãos        | Repetições |         |         | $\bar{X}$ |
|-------------------|---------------|------------|---------|---------|-----------|
|                   |               | I          | II      | III     |           |
| E <sub>1</sub> 06 | Total (1)     | 46,99      | 46,84   | 41,60   | 45,14     |
| E <sub>2</sub> 26 | Total (1)     | 952,50     | 921,25  | 865,00  | 912,92    |
| E <sub>3</sub> 46 | Total (1)     | 2042,50    | 1965,00 | 1988,75 | 1998,75   |
| E <sub>4</sub> 66 | Total (2)     | 3507,50    | 3543,75 | 3760,00 | 3603,75   |
| E <sub>5</sub> 86 | Mat. Seca (3) | 2690,00    | 2587,50 | 2788,75 | 2688,75   |
|                   | Grão          | 1487,50    | 1465,00 | 1511,25 | 1487,92   |
|                   | Total         | 4177,50    | 4052,50 | 4300,00 | 4176,67   |

(1) Parte aérea + raízes

(2) Parte aérea + vagens + raízes

(3) Parte aérea + casca das vagens + raízes

TABELA 23 - Valores dos rendimentos de matéria seca acumulados pela cultura de milho (*Zea mays* L.), em sete épocas de amostragem.

| Épocas<br>(dag)    | Órgãos        | Repetições |          |          | $\bar{x}$ |
|--------------------|---------------|------------|----------|----------|-----------|
|                    |               | I          | II       | III      |           |
| E <sub>1</sub> 11  | Total         | 16,98      | 16,98    | 16,98    | 16,98     |
| E <sub>2</sub> 31  | Total         | 471,57     | 523,82   | 460,07   | 485,15    |
| E <sub>3</sub> 46  | Total         | 2596,56    | 2418,06  | 2476,56  | 2497,06   |
| E <sub>4</sub> 77  | Total (1)     | 11205,50   | 11423,50 | 11096,50 | 11241,83  |
| E <sub>5</sub> 95  | Mat. Seca (2) | 13257,00   | 10911,00 | 13212,50 | 12460,00  |
|                    | Grão          | 4114,50    | 4355,00  | 3857,50  | 4109,00   |
|                    | Total         | 17371,50   | 15266,00 | 17069,50 | 16569,00  |
| E <sub>6</sub> 119 | Mat. Seca     | 11232,50   | 12045,50 | 10564,70 | 11281,17  |
|                    | Grão          | 9022,00    | 8479,50  | 8766,80  | 8755,83   |
|                    | Total         | 20254,50   | 20525,00 | 19331,50 | 20037,00  |
| E <sub>7</sub> 140 | Mat. Seca     | 11876,00   | 11824,50 | 10453,50 | 11383,67  |
|                    | Grão          | 9853,00    | 7353,50  | 9401,50  | 8869,33   |
|                    | Total         | 21729,00   | 19178,00 | 19855,00 | 20253,00  |

(1) Folhas + caule + raízes

(2) Folhas + caule + bráctea + sabugo + raízes

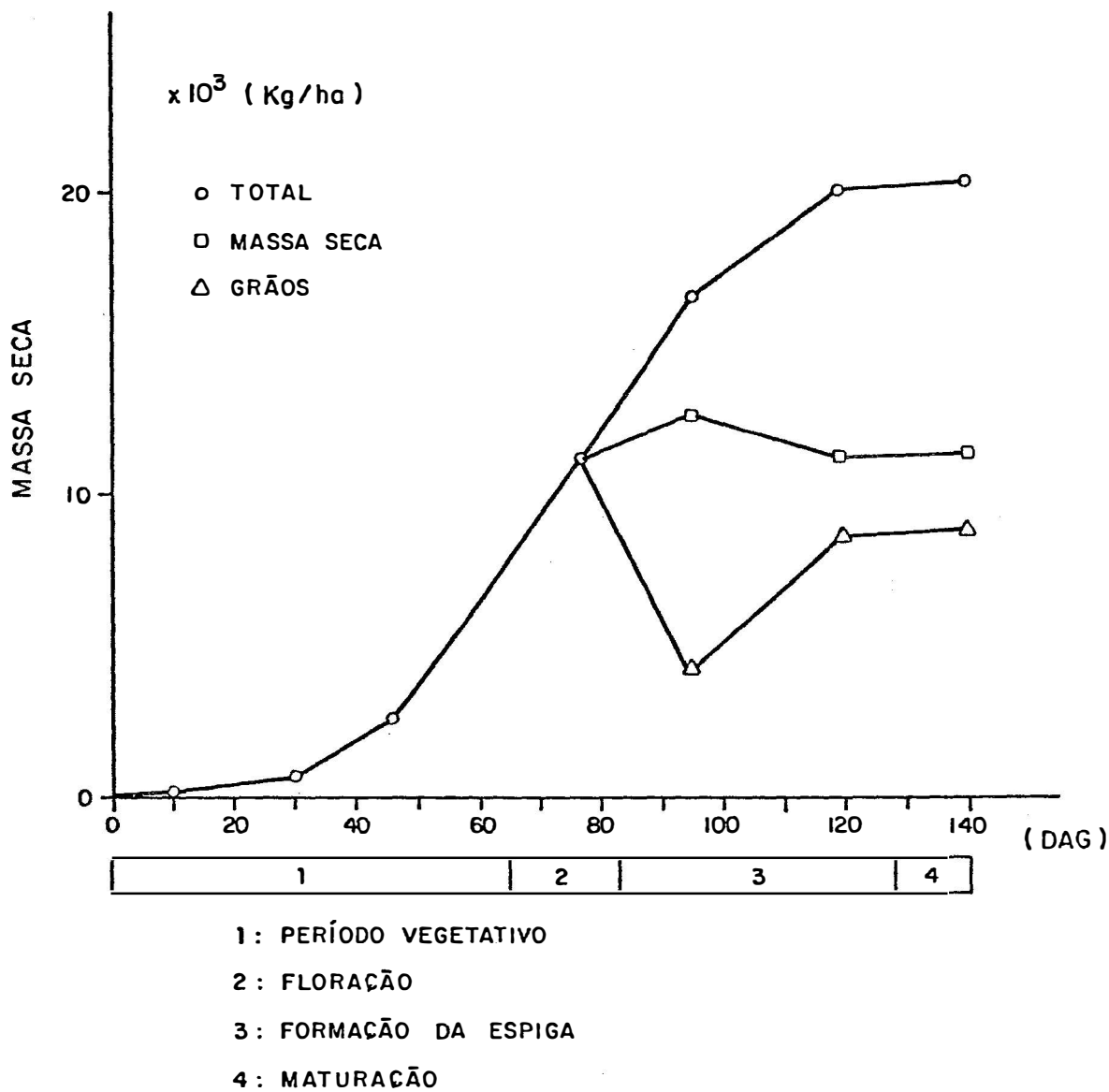


FIGURA 28 - Massa média total, massa seca e grão das plantas da cultura de milho (Zea mays L.) cultivar Cargill-501, nas diversas fases de desenvolvimento.

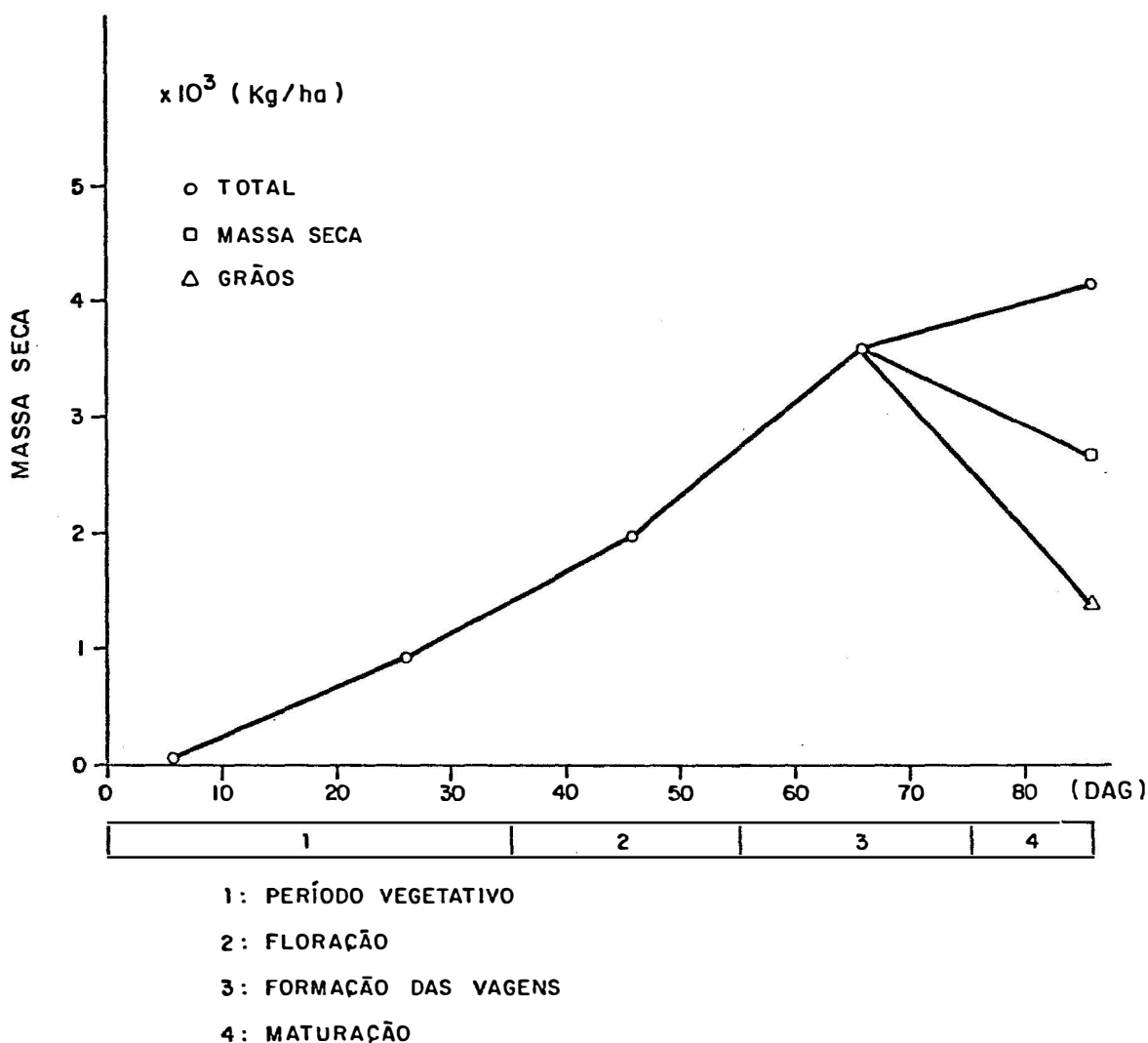


FIGURA 29 - Massa seca média total, massa seca, peso de grãos das plantas da cultura de feijão (Phaseolus vulgaris L.) cultivar carioca, nas diversas fases de desenvolvimento.



TABELA 24 - Eficiência de utilização de água pelas culturas de milho e feijão.

| Cultura | Produção<br>Kg/ha | ETP<br>cm | EUA<br>Kg/ha.cm | EUA<br>Kg/m <sup>3</sup> |
|---------|-------------------|-----------|-----------------|--------------------------|
| Feijão  | 1487,92           | 30,54     | 48,72           | 0,49                     |
| Milho   | 8869,33           | 81,69     | 108,57          | 1,09                     |

$$EUA = \frac{\text{produção}}{ETP}$$

## 5. CONCLUSÕES

(1) As equações utilizadas para descrever a curva de retenção de água ( $\theta(\psi)$ ) e condutividade hidráulica do solo de VAN GENUCHTEN (1980) e LIBARDI et alii (1980) ajustaram-se perfeitamente aos dados experimentais.

(2) A Terra Roxa Estruturada estudada possui características morfológicas e físicas bem distintas nas diversas camadas avaliadas neste experimento. Pelos dados experimentais obtidos pode-se dividi-la em três camadas, segundo as semelhanças quanto às suas características físicas (densidade global; porosidade total) e hídricas (curva de retenção de umidade; redistribuição da água no solo; condutividade hidráulica). Estas três camadas correspondem a 0 - 45 cm, 45 - 75 cm e 75 - 135 cm.

(3) O método do perfil instantâneo utilizado para a determinação da função  $K(\theta)$  possui algumas limitações quando é aplicado em solos com horizontes adensados (como  $B_2t$ ). Não se consegue saturar perfeitamente todo o perfil do solo. As estimativas de condutividade hidráulica próximas à saturação do solo tornam-se imprecisas.

(4) A utilização de uma equação exponencial para a função  $K(\theta)$  ajustou perfeitamente os dados experimentais com coeficientes de correlação ( $r$ ) acima de 0,97.

(5) Os coeficientes de variação (CV%) da condutivi-

dade hidráulica numa mesma profundidade foi de, no máximo, 1,2 vezes o valor da média. Numa mesma umidade volumétrica ( $\theta = 45\%$ , por exemplo), as camadas mais profundas (75 - 120 cm) tiveram uma condutividade hidráulica  $10^4$  vezes maior que as camadas superficiais (30 - 45 cm). Os valores de umidade volumétrica ( $\theta$ ) do solo na capacidade de campo variaram muito entre as camadas. Para a camada de 30 - 45 cm foi de 44,5%; para a camada de 45 - 75 cm, foi de 41%; para a de 75 - 135 cm, teve um valor médio de 34,3%. Estes valores de umidade volumétrica corresponderam a potenciais matriciais ( $\psi_m$ ) de 80, 100 e 177 cm de água, respectivamente. Apesar das diferenças de umidade volumétrica na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ), a condutividade hidráulica nesta umidade volumétrica variou de menos de uma ordem de valor da média geral ( $5,56 \cdot 10^{-4}$  ( $3,30 \cdot 10^{-4}$ )), indicando que, apesar das diferenças morfológicas e físicas, a condutividade hidráulica do solo na umidade de capacidade de campo variou pouco (CV= 58%) entre os diversos horizontes.

(6) A estimativa da evapotranspiração das culturas de feijão (Phaseolus vulgaris L.) cultivar carioca e milho (Zea mays L.) cultivar Cargill-501 foram prejudicadas pela não contabilização da umidade volumétrica na camada de aproximadamente 0 - 22,5 cm na superfície do solo e do deflúvio superficial (que foi considerado inexistente). Em períodos de precipitação intensa e frequente, há uma superestimativa da evapotranspiração em relação ao ECA e ET / Penman, devido à não contabilização da variação de armazenamento na camada arável e a provável ocorrência de deflúvio superficial. Em épocas de baixa precipitação e alta demanda atmosférica, a evapotranspiração calculada das culturas foi subestimada pois não era possível detectar no primeiro tensiômetro (a 30 cm) a retirada de á-

gua da camada de 0-22,5 cm. Tentou-se uma correção para os valores de evapotranspiração super e subestimados em relação à evaporação do Tanque Classe A e a evapotranspiração de Penman, que determinaram uma variação de 6% da evapotranspiração para a cultura de feijão e 15% para a cultura de milho. O deflúvio superficial, que foi outro fator a favorecer a superestimativa da evapotranspiração, não teve sua influência avaliada, que deve ter acontecido, principalmente, na fase inicial do desenvolvimento da cultura de feijão e durante todo o ciclo da cultura de milho, que recebeu uma grande quantidade de água por precipitação. A profundidade do solo em que 90% da evapotranspiração ocorreu foi de 60 cm, tanto para a cultura de feijão, como para a cultura de milho. A evapotranspiração total da cultura de feijão foi de 305,36 mm, o que dá uma média de 3,55 mm/dia. A cultura de milho teve uma evapotranspiração de 816,92 mm, o que dá uma média de 6,28 mm/dia.

(7) As perdas de água por drenagem profunda foram de 15 e 6% da precipitação ou 17 e 6% da evapotranspiração calculada, nas profundidades de 45 e 60 cm, respectivamente, do balanço hídrico para a cultura de feijão. Para a cultura de milho, as perdas por drenagem profunda foram de 20 e 3% da precipitação ou 25 e 3% da evapotranspiração, nas profundidades de 45 e 60 cm, respectivamente. A variação da drenagem profunda foi de, no máximo, duas vezes o valor médio. Esta é devida à própria variação da condutividade hidráulica (de até 1,2 vezes o valor médio numa mesma profundidade) e à distribuição do sistema radicular.

(8) A produção de grãos (secos em estufa a 60°C, até

peso seco) foi de 1488 Kg/ha de feijão e 8869 Kg/ha de milho. A eficiência de utilização de água (EUA) foi de 0,49 Kg/m<sup>3</sup> para a cultura de feijão e 1,09 Kg/m<sup>3</sup> para a de milho, valores que são da ordem de grandeza de outros experimentos encontrados na literatura especializada.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BABALOLA, O. Spatial variability of soil water properties in tropical soil of Nigeria. Soil Science, 126: 269-279, 1978.
- BAKER, F.G. Variability of hydraulic conductivity within and between nine Wisconsin soil series. Water Res. Res., 14: 103-108, 1978.
- BAKER, F.G.; VENEMAN, P.L.M.; BOUMA, J. Limitations of the instantaneous profile method for field measurement of unsaturated hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 38: 885-888, 1974.
- BARLOW, E.W.R.; BOERSMA, L.; YOUNG, J.E. Root temperature and soil water potential effects on growth and soluble carbohydrate concentration of corn seedlings. Crop Science, 16: 59, 1976.
- BARRADA, Y. Water balance studies. In: FAO. Water use seminar. Damascus, Roma (Irrigation and Drainage Paper, nº 13), p. 90-96, 1971.
- BEAR, J. Hydrodynamic dispersion. In: DE WIEEST, R.J., ed. Flow through porous media. New York, Academic Press, 1970. cap. 4, p. 109-199.
- BERGAMASCHI, H. Perda de água e desenvolvimento do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.) sob diferentes condições da disponibilidade

- hídrica no solo e da atmosfera. Piracicaba, 1984. 204 p.  
(Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da  
Universidade de São Paulo).
- BERGAMASCHI, H. & WESTPHALEN, S.L. Efeitos de regimes de umidade  
do solo em diferentes estádios de desenvolvimento e populações  
no rendimento do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.). In: REUNIÃO  
TÉCNICA ANUAL DO FEIJÃO. Porto Alegre, 1976. p. 35-50.
- BERTRAND, A.R. & KOHNKE, H. Subsoil conditions and their effects  
on oxygen supply and the growth of corn roots. Soil Sci. Soc.  
Proc., 21: 135, 1957.
- BLACK, T.A.; TANNER, C.B.; GARDNER, W.R. Evapotranspiration from a snap  
bean crop. Agron. J., 62: 66-69, 1970a.
- BLACK, T.A.; GARDNER, W.R.; TANNER, C.B. Water storage and drainage  
under a row crop on a sandy soil. Agron. J., 62: 48-51, 1970b.
- BLACK, T.A.; GARDNER, W.R.; THURTELL, G.W. The prediction of  
evaporation, drainage and soil water storage from a bare soil.  
Soil Sci. Soc. Am. Proc., 33: 655-660, 1969.
- BLAD, B.L. Atmosphere demand for water. In: TEARE, I.D. & PEET,  
M.M., ed. Crop water relations. New York, John Wiley & Sons,  
1983. p. 1-44.
- BLAKE, G.R. Bulk density. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil  
analysis. Madison, Amer. Soc. Agron. Part I, Agronomy 9, 1965.  
p. 374-390.
- BOERSMA, L. Field measurement of hydraulic conductivity below a

- water table. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis.  
Madison, Amer. Soc. Agron. Part I, Agronomy 9, 1965. p. 222-233.
- BROOKS, R.H. & COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media.  
Colorado State University, Hydrology Paper nº 3, 1964. 27 p.
- BRUCE, R.R. & KLUTE, A. Measurement of soil moisture diffusivity.  
Soil Sci. Soc. Am. Proc., 20: 458-462, 1965.
- BRUNINI, O. Relação entre o potencial da água no solo e nas folhas  
e a transpiração em mudas de cafeeiro. In: II CONGRESSO  
BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. Resumos. Pelotas, Soc. Bras.  
Agrometeorologia, UFPEL, 1981. p. 125-129.
- BUCKINGHAM, E. Studies on the movement of soil moisture. USDA Bur.  
Soils, Bull. 38, 1907.
- BUCKMAN, H.O. & BRADY, N.C. The nature and properties of soils.  
Toronto, MacMillan, 1969. 653 p.
- BURDINE, N.T. Relative permeability calculations from pore-size  
distribution data. Petroleum Trans. Am. Inst. Min. Eng., 198:  
71-77, 1953.
- BURMAN, R.D. & BOLMONT, D.W. Evaluating the growth rate of great  
Northern beans as influenced by soil moisture level under green  
house conditions. Agron. J., 53: 354-355, 1961.
- CAMERON, D.R. Variability of soil retention curves and predicted  
hydraulic conductivity on a small plot. Soil Science, 126:  
364-371, 1978.
- CARVALHO, H.O. & AZEVEDO, H.M. de. Determinação da condutividade



- hidráulica não saturada, baseada na curva de retenção de água do solo. Fortaleza, III SENIR/MINTER/DNOCS, 1975.
- CAVALCANTE, L.F.; REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L. Determinação da condutividade hidráulica do solo durante a redistribuição da água. R. bras. Ci. Solo, 2: 77-79, 1978.
- CASTRO, P.T. de. Evapotranspiração atual e potencial de uma cultura de milho (Zea mays L.). Piracicaba, 1979. 61 p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo).
- CERVELLINI, A.; SALATI, E.; FERRAZ, E.S.B.; VILLA NOVA, N.A.; REICHARDT, K.; DECICO, A.; OMETTO, J.C.; PEDRO JUNIOR, M.J. Análise dos dados meteorológicos de Piracicaba, SP. Boletim Científico, ESALQ/USP, 1973. 26 p.
- CHILDS, E.C. The physical basis of soil water phenomena. New York, John Wiley & Sons, 1969. 493 p.
- CHILDS, E.C. & COLLIS-GEORGE, N. The permeability of porous materials. Roy. Soc. Proc., A201: 392-405, 1950.
- CHOUDHURY, E.N. & MILLAR, A.A. Retenção e movimento de água em Latossolo Vermelho-Amarelo irrigado de Petrolina (PE). R. bras. Ci. Solo, 7: 21-26, 1983.
- CLAPP, R.B. & HORNBERGER, G.M. Empirical equations for some hydraulic properties. Water Res. Res., 14: 601-604, 1978.
- COLMAN, E.A. A laboratory procedure for determining of field capacity of soils. Soil Science, 67: 277-283, 1947.

- COWAN, I.R. Transport of water in soil-plant-atmosphere system. J. Appl. Ecol., 2: 221-229, 1965.
- CRUZ, G. & TANNER, C. Desarrollo y distribucion del sistema radicular del trigo y maiz evaluado en condiciones de campo. Anales Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Madrid, (2): 75-101, 1972.
- DANG, J.H. Comparison of field and laboratory determined hydraulic conductivity values. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 228-231, 1980.
- DARCY, H. Les fontaines publique de la Ville de Dijon. Paris, Victor Dalmont, 1856.
- DAVIDSON, J.M.; STONE, L.R.; NIELSEN, D.R.; LA RUE, M.E. Field measurement and use of soil properties. Water Res. Res., 5: 1312-1321, 1969.
- DE JONG, E. Moisture retention of selected Saskatchewan soils. In: RENNIE, D.A. Soil plant nutrient. Sask. Inst. of Ped. n° M6, 1967. 100 p.
- DE JONG, R. Assessment of empirical parameters that describe soil water characteristics. Can. A. Eng., 24: 65-70, 1982.
- DE JONG, R.; CAMPBELL, C.A.; NICHOLAICHUK, W. Water relation equations and their relationship to soil organic matter and particle size distribution for disturbed samples. Can. J. Soil Sci., 63: 291-302, 1983.
- DE JONG, R. & LOEBEL, K. Empirical relation between soil components and water retention at 1/3 and 15 atmospheres. Can. J. Soil Sci.,

62: 343-350, 1982.

DOORENBOS, J. & KASSAN, A.H. Yield response to water. Roma, FAO, 1979. 193 p.

DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. Crop water requirements. Irrigation and drainage. Paper nº 24. FAO, Roma, 1975.

DOWNEY, L.A. Effect of gypsum and drought stress on maize (Zea mays L.). I. Consumptive use of water. Agronomy Journal, 63: 597-600, 1971.

DOWNEY, L.A. Water-yield relation for nonforage crops. Journal of the Irrig. and Drain., 98: 107-115, 1972.

ELRICK, D.E. & TANNER, C.B. Influence of sample pretreatment on soil moisture retention. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1955.

ENCARNAÇÃO, C.R.F. da. Estudo da demanda do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.) var. Goiano Precoce. Piracicaba, 1980. 62 p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo).

ESPINOZA, W. Resposta de doze cultivares de milho ao déficit hídrico num Latossolo Vermelho-Escuro (Typic haplustox) de cerrado do Distrito Federal. Pesq. agropec. bras., 17: 905-915, 1982.

GARDNER, W.R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Science, 85: 228-232, 1958.

GARDNER, W.R. Dynamics aspects of water availability to plants. Soil Science, 89: 63-73, 1960.

- GARDNER, W.R. Availability and measurement of soil water. In: Water deficits and plant growth. Vol. I, p. 107-135, Academic Press, New York, 1968.
- GARDNER, W.R. Soil properties and efficient water use: an overview. In: TAYLOR, H.W., ed. Limitations to efficient water use in crop production. New York, American Society of Agronomy, 1983. p. 45-64.
- GARDNER, W.R. & EHLIG, C.F. The influence of soil water on transpiration by plants. J. Geophys. Res., 68: 5719-5724, 1963.
- GARRIDO, M.A.T.; PURCINO, J.R.C.; LIMA, C.A.S. Efeito de diferentes níveis de umidade do solo sobre o rendimento do feijoeiro comum na região Norte de Minas Gerais. In: EPAMIG. Relatório 76/77. Belo Horizonte, 1978. p. 28-30.
- GARRIDO, M.A.T. & TEIXEIRA, H.A. Efeito de diferentes níveis de umidade do solo sobre o rendimento do feijoeiro comum na região Sul de Minas Gerais. In: EPAMIG. Relatório 76/77. Belo Horizonte, 1978. p. 25-27.
- GARRIDO, M.A.T.; PURCINO, J.R.C.; LIMA, C.A.S. Efeito de diferentes regimes de irrigação sobre o rendimento do feijoeiro na região Norte de Minas Gerais. In: EPAMIG. Relatório 77/78. Belo Horizonte, 1979. p. 27-29.
- GIRALT, P.E. Regimen de riego del cultivo de frijol negro (Phaseolus vulgaris L.). In: Ciência y técnica en la agricultura. Série Riego y Drenage, 2(1): 5-28, 1979.
- GROHMANN, F.; BRUNINI, O.; REICHARDT, K. Condutividade hidráulica

- do solo. Campinas, Instituto Agronômico, Circular nº 53, 1976.  
28 p.
- GUIMARÃES, C.M.; STEINMETZ, S.; PORTES CASTRO, A.T. Uso de microlisímetros na determinação da evapotranspiração do feijoeiro da seca. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO. Goiânia, CNPAF, 1982. p. 133-137.
- HALTERLEIN, A.J. Bean. In: TEARE, I.D. & PEET, M.M. Crop water relations. New York, John Wiley & Sons, 1983. p. 157-186.
- HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic conductivity in situ. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 114: 395-400, 1972.
- HILLEL, D. Application of soil physics. Academic Press, 1980.
- HOLMES, J.W.; TAYLOR, S.A.; RICHARDS, S.J. Measurement of soil water. In: HAGAN, R.M.; HAISE, H.R.; EDMINSTER, T.W., eds. Irrigation of agricultural lands. Madison, Agronomy 11, 1967. p. 275-303.
- HUDSON, N.W. Soil conservation. London, Batsford, 1971.
- INOUE, M.; YANO, T.; CHIKUSHI, J. Optimum values of parameters in equations for estimating the soil water characteristics curve and relative hydraulic conductivity of sandy soils. J. Fac. Agric. Tottori Univ., 19: 24-34, 1983.
- JACKSON, M.L. Análisis químico de suelos. 3a. ed., Barcelona, Omega, 1976. 662 p.
- KALMA, J.D. & STANHILL, G. Transpiration, evaporation and deep drainage losses from an orange plantation. Israel Journal of

- Agric. Res., 19: 11-24, 1969.
- KILMER, V.J. & ALEXANDER, V.T. Methods of making mechanical analysis of soils. Soil Science, 68: 15-26, 1949.
- KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Madison, Am. Soc. Agron. Part I, Agronomy 9, 1965a. p. 210-221.
- KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soil. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Madison, Am. Soc. Agron. Part I, Agronomy 9, 1965b. p. 253-261.
- KLUTE, A. The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils. Soil Science, 113: 264-276, 1972.
- KRAMER, P.J. Plant and soil water relationship: a modern synthesis. New York, Mc-Graw-Hill, 1969. 482 p.
- KUMAR, S.; MALIK, R.S.; DAHIYA, I.S. Influence of different organic wastes upon water retention, transmission and contact characteristics of a sandy soil. Aust. J. Soil Res., 23: 131-136, 1985.
- LALIBERTE, G.E. A mathematical function for describing capillary pressure-desaturation data. Bull. Int. Ass. Sci. Hidrol., 14: 131-149, 1969.
- LAROUSSE, C.H.; TOUZZI, T.; BACKER, L.W. Hydraulic conductivity of saturated porous media in relation to their geometrical characteristics. Soil Science, 132: 387-393, 1981.

- LEMON, E.R. The potencialities for decreasing soil moisture evaporation loss. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 20: 120-125, 1965.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera. Piracicaba, CENA/USP, 1984. 232 p.
- LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NASCIMENTO FILHO, V.F. Análise da redistribuição da água visando a condutividade hidráulica do solo. Energia Nuclear e Agricultura, 1: 108-122, 1979.
- LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 3-7, 1980.
- MAGALHÃES, A.A. & MILLAR, A.A. Efeito do déficit de água no período reprodutivo sobre a produção do feijão. Pesq. agropec. bras., 13: 155-160, 1978.
- MAGALHÃES, A.A.; MILLAR, A.A.; CHOUDHURY, E.N.; CHOUDHURY, M.M. Efeito do déficit fenológico de água sobre a produção do feijão. Turrialba, 29: 269-273, 1979.
- MANFRON, P.A. Análise quantitativa do crescimento do cultivar Ag-401 (Zea mays L.) sob diferentes sistemas de preparo do solo e população de plantas. Piracicaba, 1986. 120 p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo).
- MARSHALL, T.J. A relation between permeability and size distribution of pores. J. Soil Sci., 9: 1-8, 1958.
- MARTIN, J.H.; LEONARD, W.H.; STAMP, D.C. Principles of field crop

- production. 3a. ed., New York, Mac Millan, 1976.
- MATZENAUER, R. Determinação do coeficiente de cultura Kc para a cultura do milho (Zea mays L.) em duas épocas de semeadura. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, Londrina, 1985. Resumos. Fundação Cargill, p. 16-17.
- MAYAKI, W.C.; STONE, L.R.; TEARE, I.D. Irrigated and nonirrigated soybean, corn and grain sorghum root systems. Agron. J., 68: 532, 1976.
- MILLAR, A.A. Manejo racional da irrigação: uso de informações básicas sobre diferentes culturas. Brasília, IICA: Série Publicações Miscelâneas nº 461, 1984. 56 p.
- MILLAR, A.A. & GARDNER, W.R. Effect of the soil plant water potentials on the dry matter production of snap beans. Agron. J., 64: 559-562, 1972.
- MILLER, E.E. & KLUTE, A. The dynamic of soil water. Part I: Mechanical forces. In: HAGAN, R.M. et alii, eds. Irrigation of agricultural lands. Madison, Agronomy 11, 1967. p. 209-240.
- MILLINGTON, R.J. & QUIRK, J.P. Permeability of porous media. Nature, 183: 387-388, 1959.
- MILLINGTON, R.J. & QUIRK, J.P. Transport in porous media. Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci., 1: 97-106, 1960.
- MILLINGTON, R.J. & QUIRK, J.P. Permeability of porous solids. Trans. Faraday Soc., 57: 1200-1207, 1961.
- MIYASAKA, S.; ALMEIDA, L.D.; BUSILANI, E.A. Cultura do feijão "s.n.t."



- MONTEITH, J.L. Vegetation and the atmosphere. London, Academic Press, 1975. 277 p.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Res. Res., 12: 513-522, 1976.
- NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; ERH, K.T. Spatial variability of field measured soil water properties. Hilgardia, 42: 215-259, 1973.
- NIELSEN, D.R.; DAVIDSON, J.M.; BIGGAR, J.W.; MILLER, R.J. Water movement through Parroche Clay Loam soil. Hilgardia, 35: 491-506, 1962.
- OGATA, G. & RICHARDS, L.S. Water content changes following irrigation of bare field soil that is protected from evaporation. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 21: 355-356, 1957.
- OMETTO, J.C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 1981. 425 p.
- OOSTERVELD, M. & CHANG, E.C. Empirical relations between laboratory determinations of soil texture and moisture retention. Can. Agric. Eng., 22: 149-151, 1980.
- OSUJI, G.E. Water storage, water use and maize yield for tillage systems on a tropical alfisol in Nigeria. Soil & Tillage Research, 4: 339-348, 1984.
- PATTERSON, G.T. & WALL, G.J. Within-Pedon variability in soil properties. Can. J. Soil Sci., 62: 631-639, 1982.
- PAULA SOUZA, M.L.; REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L. Perdas de água no solo por drenagem profunda. En. Nucl. Agric., 1: 82-93, 1979.

- PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water bare soil and grass. Proc. R. Soc., Series A, 193 : 120-145, 1948.
- PENMAN, H.L. Evaporation: an introductory survey. Neth. J. Agric. Sci., 4: 9-29, 1956.
- PHILIP, J.R. Plant and water relations: some physical aspects. Ann. Rev. Plant Physiol., 17: 245-268, 1966.
- PREVEDELLO, B.M.S.; PREVEDELLO, C.L.; LIBARDI, P.L. Simplificação analítica do método do perfil instantâneo para obtenção da condutividade hidráulica não saturada em condições de campo. R. bras. Ci. Solo, 5: 93-97, 1981.
- RAGAB, R.; FEYEN, J.; HILLEL, D. Effect of the method for determining pore size distribution on prediction of the hydraulic conductivity function and of infiltration. Soil Science, 134: 141-145, 1982.
- RANZANI, G.; FREIRE, O.; KINJO, T. Carta de solos do município de Piracicaba. Piracicaba, ESALQ/USP, 1966. 85 p.
- REICHARDT, K. & LIBARDI, P.L. An analysis of soil water movement in the field. I. Hydrological field site characterization. Piracicaba, CENA, BC-021, 1974. 21 p.
- REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. Campinas, Fundação Cargill, 1975. 286 p.
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; SANTOS, J.M. dos. An analysis of soil water movement in the field. II. Water balance in a snap bean crop. Piracicaba, BC-022, 1974. 19 p.
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; SAUNDERS, L.C.U.; CADIMA Z., A.

- Dinâmica da água em solo cultivado com milho. R. bras. Ci. Solo, 3: 1-5, 1979.
- REICHARDT, K.; GROHMANN, F.; LIBARDI, P.L.; QUEIROZ, S.V. Spatial variability of physical properties of a tropical soil: II. Soil water retention curves and hydraulic conductivity. Piracicaba, CENA, BT-005, 1976. 24 p.
- REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Scaling of horizontal infiltration into homogeneous soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36: 241-245, 1972.
- RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids in porous mediuns. Physics, 1: 318-333, 1931.
- RICHARDS, L.A. Physical condition of water in soil. In: BLACK, C. A., ed. Methods of soil analysis. Madison, Am. Soc. Agron. Part I, Agronomy 9, 1965. p. 128-151.
- RICHARDS, S.J. Soil suction measurements with tensiometers. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Madison, Am. Soc. Agron. Part I, Agronomy 9, 1965. p. 153-163.
- RICHARDS, L.A.; GARDNER, W.R.; OGATA, G. Physical processes of determining water loss from soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 20: 310-314, 1956.
- RICHARDS, S.J. & WEEKS, L.V. Capillary conductivity values from moisture yield and tension measurements on soil columns. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 17: 206-208, 1953.
- RITCHIE, J.T. Influence of soil water status and meteorological

- conditions on evaporation from a corn canopy. Agron. J., 65: 893, 1973.
- ROBINS, J.S. & DOMINGO, C.E. Some effects of severe soil moisture deficits at specific growth stages of corn. Agron. J., 45: 618-621, 1953.
- ROBINS, J.S. & DOMINGO, C.E. Moisture deficits in relation to the growth and development of dry beans. Agron. J., 48: 67-70, 1955.
- ROSE, C.W. Agricultural physics. Oxford, Pergamon Press, 1966. 230 p.
- ROSE, C.W.; STERN, W.R.; DRUMMOND, J.E. Determination of hydraulic conductivity as a function of depth and water content for soil in situ. Aust. J. Soil Res., 3: 1-9, 1965.
- ROSE, C.W. & STERN, W.R. Determination of withdrawal of water from soil by crop roots as a function of depth and time. Aust. J. Soil Res., 5: 11-19, 1967.
- ROSENBERG, N.J. Microclimate: the biological environmental. Canada, John Wiley & Sons, 1974. 315 p.
- ROULIER, M.H.; STOLZY, L.H.; LETEY, J.; WEEKS, L.V. Approximation of field hydraulic conductivity by laboratory procedures on intact cores. Soil Sci. Soc. Am. J., 36: 387-393, 1972.
- ROUSE, W.R. & WILSON, R.G. A test of the potential accuracy of the water budget approach to estimating evapotranspiration. Agric. Meteorology, 9: 421-446, 1971/1972.

- SALISBURY, F.B. & ROSS, C. Plant physiology. Belmont, California, Wadsworth Publ. Com. Inc., 1969. 747 p.
- SALTER, P.J. & WILLIAMS, J.B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. I. A critical comparison of techniques for determining the available water capacity and moisture characteristic curve of a soil. Journal of Soil Science, 16: 1-15, 1965.
- SAUNDERS, L.C.U. Métodos de determinação e variabilidade espacial da condutividade hidráulica sob condições de campo. Piracicaba, 1978. 71 p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo).
- SAUNDERS, L.C.U.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Condutividade hidráulica da Terra Roxa Estruturada em condições de campo. R. bras. Ci. Solo, 2: 164-167, 1978.
- SILVEIRA, P.M. da & STONE, L.F. Balanço de água na cultura do feijão em Latossolo Vermelho-Amarelo. Pesq. agropec. bras., 14: 115-145, 1979.
- SLATYER, R.O. Agroclimatological models. UNESCO Natl. Resources Res., 7: 73-87, 1968.
- SLATYER, R.O. Plant water relationships. 3a. edição, New York, Academic Press, 366 p.
- SLICHTER, C.S. Theoretical investigation of the motion of ground water. U.S. Geol. Survey. 19th Ann. Rep. Part 2, 1898. p. 295-384.
- SOIL SURVEY STAFF. Soil survey manual. U.S. Dept. Agric. Handbook, 1951.

- SOUZA, M.L.P. Drenagem profunda em Terra Roxa Estruturada. Piracicaba, 1978. 77 p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo).
- SOUZA, M.L.P.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Propagação de erros na medida de fluxos de água no solo em condições de campo. R. bras. Ci. Solo, 3: 137-140, 1979.
- SWARTZENDRUBER, D. Soil water behavior as described by transport coefficients and functions. Adv. Agron., 18: 327-370, 1966.
- SWARTZENDRUBER, D. The flow of water in unsaturated soils. In: DE WIEST, R.J.M., ed. Flow through porous media. New York, Academic Press, Inc., 1969. Cap. 6, p. 215-292.
- TAYLOR, S.A. Managing irrigation water on the farm. Amer. Soc. Agr. Eng. Trans., 8: 433-436, 1975.
- TAYLOR, H.W. Managing root system for efficient water use: an overview. In: TAYLOR, H.W., ed. Limitations to efficient water use in crop production. New York, American Society of Agronomy, 1983. p. 87-114.
- TAYLOR, S.A.; EVANS, D.D.; KEMPER, W.D. Evaluating soil water. Utah State University, Agr. Expt. Sta. Bull. nº 426, 1961. 67 p.
- TAYLOR, S.A. & ASHCROFT, G.L. Physical edaphology: the physics of irrigated and nonirrigated soils. San Francisco, W.H. Freeman Co., 1972. 533 p.
- ULLOA, A.M.C.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Utilização do nitrogênio fertilizante por dois híbridos de milho. Campinas, Fundação

Cargill, 1982. 66 p.

U.S.D.A. Soil taxonomy. A basic system of soil classification to making and interpreting soil surveys. Washington, 1975. 754 p.

UNGER, P.W. & STEWART, B.A. Soil management for efficient water use: an overview. In: TAYLOR, H.W., ed. Limitation to efficient water use in crop production. New York, American Society of Agronomy, 1983. p. 419-450.

VACHAUD, G.; DANCETTE, C.; SONKO, S.; THONY, J.L. Methodes de caracterisation hydrodynamique in situ d'un soil non saturé. Grenoble, Inst. de Méc. de Grenoble, IMS/CNRS, 1977. 28 p.

VACHAUD, G.; TEHEL, J.; ROYER, J.M.; BOLCATO, J.R. Controle automatique "in situ" des transferts d'eau dans la zone non saturée. Applications a la determination du bilian hydrique. IAEA, Viena, 1973. 26 p.

VAN BAVEL, C.H.M.; STIRK, G.B.; BRUST, K.J. Hydraulic properties of a clay loam soil and the field measurement of water uptaken by roots. I. Interpretation of water content and pressure profiles. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 32: 310-317, 1968.

VAN GENUCHTEN, M.Th. Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form model. Research Report 78-WR-08, Dept. of Civil Eng., Princeton, New Jersey, 1978. 63 p.

VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 44: 892-898, 1980.

- VAN GENUCHTEN, M.Th. & NIELSEN, D.R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. Ann. Geophys., 3: 615-628, 1985.
- VAUCLIN, M.; IMBERNON, J.; VACHAUD, G. Analyse comparative de différentes méthodes de détermination de la conductivité hydraulique des sols non saturés de la zone centre-nord du Sénégal. L'Agronomie Tropicale, 38: 186-197, 1982.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; BERNARD, R.; HATFIELD, J.L. Spatial variability of surface temperature along two transects of a bare soil. Water Res. Res., 18: 1677-1686, 1982.
- VIETS JUNIOR, F.C. Efficiency of water use on semi-arid land. In: IAEA. Efficiency of water and fertilizers use in semi-arid regions. Viena, 1976. p. 123-133.
- VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Spatial variability of field measured infiltration rate. Soil Sci. Soc. Am. J., 45: 1040-1048, 1981.
- VILLA NOVA, N.A. Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz. Piracicaba, 1973. 78 p. (Livre-Docência - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo).
- VILLA NOVA, N.A.; BARBIERI, V.; SCARDUA, R. Evaporação e evapotranspiração: principais métodos de estimativa climatológica segundo recomendação da FAO (1979). Piracicaba, ESALQ/USP, 1980. 22 p.
- VILLA NOVA, N.A.; VENCOVSKI, R.; OMETTO, J.C.; DECICO, A. Contribuição



- ao estudo do vento em Piracicaba, SP. In: SEMANA DE ESTUDO DE METEOROLOGIA AGRÍCOLA DO PARANÁ. Curitiba, PR. Anais. 1973.
- VISSER, W.C. An empirical expression for the desorption curve. In: RYTEMA, P.E. & WASSINK, H., eds. Water in the unsaturated zone. Wageningen Symposium - IASH/AIHS-UNESCO, 1968. Paris, vol. I: 329-335.
- WALL, B.H. & MILLER, A.J. Optimization of parameters in a model of soil water drainage. Water Res. Res., 19: 1565-1572, 1983.
- WALDREN, R.P. Corn. In: TEARE, I.D. & PEET, M.M., eds. Crop-water relations. New York, John Wiley & Sons, 1983. p. 187-212.
- WANG, C. Variability of soil properties in relation to size of map unit delineation. Can. J. Soil Sci., 62: 657-662, 1982.
- WARRICK, A.W.; MULLEN, G.J.; NIELSEN, D.R. Prediction of the soil water flux based upon field-measured soil-water properties. Soil Sci. Soc. Am. J., 41: 14-19, 1977.

**A P P E N D I C E**

TABELA 1 - Dados de precipitação da cultura de milho (Zea mays L.),  
cultivar Cargill-501.

| Data  | Precipitação<br>(mm) | Data  | Precipitação<br>(mm) |
|-------|----------------------|-------|----------------------|
| 16/11 | 0,9                  | 26/01 | 3,5                  |
| 18/11 | 26,0                 | 27/01 | 4,0                  |
| 19/11 | 0,7                  | 28/01 | 9,0                  |
| 20/11 | 10,0                 | 29/01 | 1,7                  |
| 30/11 | 31,3                 | 31/01 | 0,2                  |
| 01/12 | 39,9                 | 01/02 | 20,2                 |
| 02/12 | 0,1                  | 02/02 | 0,3                  |
| 04/12 | 25,0                 | 04/02 | 43,0                 |
| 05/12 | 35,8                 | 05/02 | 11,5                 |
| 06/12 | 5,4                  | 06/02 | 8,0                  |
| 07/12 | 19,0                 | 07/02 | 44,9                 |
| 08/12 | 19,0                 | 16/02 | 6,7                  |
| 09/12 | 19,0                 | 17/02 | 1,0                  |
| 12/12 | 19,1                 | 18/02 | 1,2                  |
| 17/12 | 2,3                  | 19/02 | 7,8                  |
| 23/12 | 2,0                  | 23/02 | 2,4                  |
| 24/12 | 23,6                 | 24/02 | 53,2                 |
| 27/12 | 1,0                  | 25/02 | 21,6                 |
| 01/01 | 29,9                 | 01/03 | 9,9                  |
| 02/01 | 4,0                  | 09/03 | 8,1                  |
| 07/01 | 50,0                 | 10/03 | 8,9                  |
| 08/01 | 62,8                 | 11/03 | 38,1                 |
| 09/01 | 7,1                  | 14/03 | 10,8                 |
| 10/01 | 37,2                 | 16/03 | 5,7                  |
| 11/01 | 20,3                 | 17/03 | 1,3                  |
| 12/01 | 0,4                  | 18/03 | 1,0                  |
| 20/01 | 2,8                  |       |                      |
| 22/01 | 26,3                 |       |                      |
| 23/01 | 0,8                  |       |                      |
| Total | 521,7                | Total | 324,0                |

TABELA 2 - Dados de precipitação e irrigação da cultura de feijão (Phaseolus vulgaris L.), cultivar carioca.

| Data         | Precipitação | Irrigação     |
|--------------|--------------|---------------|
|              | ---- mm ---- | --- mm ---    |
| 15/04        | 55,8         |               |
| 16/04        | 0,1          |               |
| 24/04        | 5,0          |               |
| 01/05        |              | 23,13         |
| 03/05        | 21,6         |               |
| 04/05        | 22,2         |               |
| 11/05        |              | 23,13         |
| 15/05        |              | 30,84         |
| 20/05        |              | 23,13         |
| 25/05        |              | 23,13         |
| 28/05        | 1,1          |               |
| 01/06        |              | 23,13         |
| 06/06        | 46,9         |               |
| 07/06        | 0,7          |               |
| 15/06        | 11,5         |               |
| 16/07        | 9,4          |               |
| <b>Total</b> | <b>174,4</b> | <b>146,49</b> |

TABELA 3 - Evaporação do Tanque Classe A durante o desenvolvimento da cultura de feijão (Phaseolus vulgaris L.), cultivar carioca.

| Data  | ECA | Data  | ECA | Data  | ECA | Data  | ECA |
|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| 14/04 | 4,1 | 01/05 | 4,8 | 01/06 | 3,2 | 01/07 | 5,0 |
| 15/04 | -   | 02/05 | 3,3 | 02/06 | 6,1 | 02/07 | 3,5 |
| 16/04 | -   | 03/05 | -   | 03/06 | 1,3 | 03/07 | -   |
| 17/04 | 4,8 | 04/05 | -   | 04/06 | 2,9 | 04/07 | 2,4 |
| 18/04 | 5,5 | 05/05 | 3,3 | 05/06 | 2,4 | 05/07 | 5,6 |
| 19/04 | 5,1 | 06/05 | 4,1 | 06/06 | -   | 06/07 | 4,2 |
| 20/04 | 5,0 | 07/05 | 2,7 | 07/06 | -   | 07/07 | 4,9 |
| 21/04 | 4,6 | 08/05 | 3,7 | 08/06 | -   | 08/07 | 3,9 |
| 22/04 | 5,0 | 09/05 | 4,1 | 09/06 | 2,2 |       |     |
| 23/04 | 2,0 | 10/05 | 5,1 | 10/06 | 2,7 |       |     |
| 24/04 | -   | 11/05 | 3,6 | 11/06 | 3,5 |       |     |
| 25/04 | 3,9 | 12/05 | 4,5 | 12/06 | 3,7 |       |     |
| 26/04 | 5,4 | 13/05 | 4,3 | 13/06 | 4,0 |       |     |
| 27/04 | -   | 14/05 | 5,2 | 14/06 | 1,8 |       |     |
| 28/04 | 2,2 | 15/05 | 4,5 | 15/06 | 3,1 |       |     |
| 29/04 | 2,4 | 16/05 | 2,9 | 16/06 | -   |       |     |
| 30/04 | 4,2 | 17/05 | 4,2 | 17/06 | -   |       |     |
|       |     | 18/05 | 5,0 | 18/06 | 4,1 |       |     |
|       |     | 19/05 | 3,6 | 19/06 | 2,4 |       |     |
|       |     | 20/05 | 3,8 | 20/06 | 2,1 |       |     |
|       |     | 21/05 | 2,7 | 21/06 | 1,8 |       |     |
|       |     | 22/05 | 3,4 | 22/06 | 2,2 |       |     |
|       |     | 23/05 | 4,1 | 23/06 | 3,0 |       |     |
|       |     | 24/05 | 4,1 | 24/06 | 2,8 |       |     |
|       |     | 25/05 | 3,9 | 25/06 | 2,5 |       |     |
|       |     | 26/05 | 3,9 | 26/06 | 2,3 |       |     |
|       |     | 27/05 | 3,6 | 27/06 | 3,4 |       |     |
|       |     | 28/05 | -   | 28/06 | 3,6 |       |     |
|       |     | 29/05 | 3,9 | 29/06 | 2,9 |       |     |
|       |     | 30/05 | 4,0 | 30/06 | 4,6 |       |     |
|       |     | 31/05 | 4,5 |       |     |       |     |

TABELA 4 - Evaporação do Tanque Classe A durante o desenvolvimento da cultura de milho (Zea mays L.) cultivar Cargill-501.

| Data  | ECA | Data  | ECA  | Data  | ECA | Data  | ECA  | Data  | ECA  |
|-------|-----|-------|------|-------|-----|-------|------|-------|------|
| 10/11 | 6,5 | 01/12 | -    | 01/01 | -   | 01/02 | -    | 01/03 | -    |
| 11/11 | 1,6 | 02/12 | -    | 02/01 | -   | 02/02 | -    | 02/03 | 5,6  |
| 12/11 | 6,7 | 03/12 | 5,4  | 03/01 | 5,9 | 03/02 | 4,4  | 03/03 | 11,9 |
| 13/11 | 6,9 | 04/12 | -    | 04/01 | 7,5 | 04/02 | -    | 04/03 | 1,0  |
| 14/11 | 6,3 | 05/12 | -    | 05/01 | 5,4 | 05/02 | -    | 05/03 | 5,2  |
| 15/11 | 6,3 | 06/12 | -    | 06/01 | 5,6 | 06/02 | -    | 06/03 | 3,5  |
| 16/11 | 4,6 | 07/12 | -    | 07/01 | -   | 07/02 | -    | 07/03 | -    |
| 17/11 | 6,8 | 08/12 | -    | 08/01 | -   | 08/02 | 6,1  | 08/03 | 4,5  |
| 18/11 | -   | 09/12 | -    | 09/01 | -   | 09/02 | 5,8  | 09/03 | -    |
| 19/11 | -   | 10/12 | -    | 10/01 | -   | 10/02 | 5,4  | 10/03 | -    |
| 20/11 | -   | 11/12 | 7,9  | 11/01 | -   | 11/02 | 11,9 | 11/03 | -    |
| 21/11 | 5,1 | 12/12 | -    | 12/01 | -   | 12/02 | 8,1  | 12/03 | 3,5  |
| 22/11 | 9,9 | 13/12 | 6,1  | 13/01 | 6,7 | 13/02 | 7,8  | 13/03 | 3,3  |
| 23/11 | 8,5 | 14/12 | 6,2  | 14/01 | 7,5 | 14/02 | 7,4  | 14/03 | -    |
| 24/11 | 7,8 | 15/12 | 6,8  | 15/01 | 6,8 | 15/02 | 8,7  | 15/03 | 3,6  |
| 25/11 | 7,8 | 16/12 | 5,5  | 16/01 | 8,8 | 16/02 | -    | 16/03 | -    |
| 26/11 | 7,3 | 17/12 | 6,4  | 17/01 | 7,2 | 17/02 | -    | 17/03 | -    |
| 27/11 | 7,3 | 18/12 | 6,7  | 18/01 | 8,6 | 18/02 | -    | 18/03 | -    |
| 28/11 | 8,0 | 19/12 | 9,0  | 19/01 | 7,1 | 19/02 | -    |       |      |
| 29/11 | 8,0 | 20/12 | 10,3 | 20/01 | -   | 20/02 | 6,2  |       |      |
| 30/11 | -   | 21/12 | 5,6  | 21/01 | 4,5 | 21/02 | 6,3  |       |      |
|       |     | 22/12 | 2,1  | 22/01 | -   | 22/02 | 5,1  |       |      |
|       |     | 23/12 | -    | 23/01 | -   | 23/02 | -    |       |      |
|       |     | 24/12 | 2,1  | 24/01 | 5,6 | 24/02 | -    |       |      |
|       |     | 25/12 | 6,1  | 25/01 | 1,5 | 25/02 | -    |       |      |
|       |     | 26/12 | 7,1  | 26/01 | -   | 26/02 | 3,7  |       |      |
|       |     | 27/12 | -    | 27/01 | -   | 27/02 | 3,4  |       |      |
|       |     | 28/12 | 6,4  | 28/01 | -   | 28/02 | 6,6  |       |      |
|       |     | 29/12 | 8,0  | 29/01 | -   |       |      |       |      |
|       |     | 30/12 | 7,5  | 30/01 | 4,6 |       |      |       |      |
|       |     | 31/12 | 6,8  | 31/01 | -   |       |      |       |      |