SIMULAÇÃO DA EXTRAÇÃO DE ÁGUA POR RAÍZES

CLÓVIS ANGELI SANSIGOLO

Orientador: Prof. EPAMINONDAS SANSIGOLO DE BARROS FERRAZ

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

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Junho - 1985

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. *Epaminondas S.B. Ferraz*
pela orientação desse trabalho e ao
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)
pela bolsa de estudos concedida

Í N D I C E

	<u>Página</u>
RESUMO	viii
SUMMARY.	ix
1. INTRODUÇÃO E REVISÃO DE LITERATURA	1
2. TEORIA	5
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1. Material.	14
3.2. Métodos	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5. CONCLUSÕES	44
6. LITERATURA CITADA.	45
APÊNDICE 1 - Funções de extração de água do solo pelas raí zes	55
APÊNDICE 2 - Evapotranspiração potencial (Penman-Monteith)..	58
APÊNDICE 3 - Previsão das taxas de evapotranspiração real...	59

LISTA DE TABELAS

<u>Tabela</u>	<u>Página</u>
1 - Valores experimentais de umidade volumétrica do solo em função da profundidade e do tempo.	24
2 - Potencial total médio da água no solo em função da profundidade e do tempo.	25
3 - Condutividade hidráulica média do solo em função da profundidade e do tempo	26
4 - Taxas médias de extração de água pelas raízes calculadas através do balanço hídrico para as diversas camadas e diferentes períodos.	27
5 - Resistência média do solo em função da profundidade e do tempo.	30
6 - Resistência média das raízes em função da profundidade e do tempo.	31
7 - Resistência média total em função da profundidade e do tempo.	32
8 - Taxas médias de extração de água pelas raízes calculadas através dos potenciais médios da água no solo e na planta e das resistências médias do solo e das raízes, para as diversas camadas e diferentes períodos..	33
9 - Taxas globais médias de extração de água pelas raízes em função dos potenciais totais da água nas diversas partes do sistema e das resistências médias globais..	34

Tabela

Página

10	-	Influência da condutividade hidráulica do solo e do comprimento efetivo de raízes sobre a resistência média do solo.	37
11	-	Parâmetros de geometria do fluxo de água do solo para as raízes	38

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1 - Perfis de umidade volumétrica do solo em função do tempo.	15
2 - Curva de retenção de água no solo	17
3 - Condutividade hidráulica do solo.	18
4 - Distribuição do sistema radicular no perfil de solo..	19
5 - Esquema de diferenças finitas usado nos cálculos das taxas médias de extração de água pelas raízes, em função da profundidade e do tempo.	21
6 - Parâmetro de comprimento e geometria do sistema radicular e resistência das raízes em função de profundidade.	29
7 - Contribuição das resistências globais médias do solo e das raízes para a resistência total em função do tempo e do potencial total médio da água no solo. . .	36
8 - Taxas globais médias de extração de água pelas raízes em função do gradiente de potencial entre o solo e a planta.	41
9 - Taxas médias de evapotranspiração potencial, computadas pelo método de Penman Monteith e de evapotranspiração real, tomadas como a extração global pelas raízes, em função do tempo	42

LISTA DE SÍMBOLOS

$\underline{b}$	- Parâmetro de comprimento e geometria do sistema radicular $[b(z)]$	[cm]
$\underline{c}_p$	- Calor específico do ar a pressão constante.	$[0,24 \text{ cal.g}^{-1}\text{°C}^{-1}]$
$\underline{d}$	- deslocamento do plano zero,	[cm]
$\underline{ETP}$	- Evapotranspiração potencial	$[\text{cm.dia}^{-1}]$
$\underline{e}, \underline{e}_s$	- Pressão atual e de saturação do vapor d'água.	[mb]
$\underline{ev}$	- Taxa de evaporação na superfície do solo	$[\text{cm.dia}^{-1}]$
$\underline{h}$	- Altura.	[cm]
$\underline{K}$	- Condutividade hidráulica do solo $[K(\theta)]$	$[\text{cm.dia}^{-1}]$
$\underline{K}_{VK}$	- Constante de Von Karman	[0,41]
$\underline{L}$	- Calor latente de vaporização da água. .	$[590 \text{ cal.cm}^{-3}]$
$\underline{\ell}_r$	- Comprimento de raiz por unidade de volume de solo.	$[\text{cm}^{-2}]$
$\underline{p}$	- Taxa de precipitação na superfície do solo.	$[\text{cm.dia}^{-1}]$
$\underline{q}$	- Densidade de fluxo de água no solo $[q_z]$	$[\text{cm.dia}^{-1}]$
$\underline{q}_r$	- Taxa de extração de água pelas raízes..	$[\text{cm.dia}^{-1}]$
$\underline{q}'_r$	- Taxa de extração de água pelas raízes por unidade de comprimento de raiz . . .	$[\text{cm}^2.\text{dia}^{-1}]$
$\underline{q}_r(z)$	- Taxa de extração de água pelas raízes por unidade de profundidade.	$[\text{dia}^{-1}]$
$\underline{Q}_r$	- Taxa global de extração de água pelas raízes.	$[\text{cm.dia}^{-1}]$

$\underline{r}_a$	- Resistência aerodinâmica da cultura à difusão do vapor d'água.	[dia.cm ⁻¹]
$\underline{r}_s, \underline{r}_r$	- Resistência do solo e das raízes [$\underline{r}_s(z), \underline{r}_r(z)$]	[dia]
$\underline{R}_n$	- Radiação solar líquida.	[cal.cm ⁻² .dia ⁻¹]
$\underline{R}_s, \underline{R}_r$	- Resistência global do solo e das raízes.	[dia]
$\underline{t}$	- Tempo	[dia]
$\underline{u}$	- Velocidade do vento [$u(h)$].	[cm.dia ⁻¹]
$\underline{z}$	- Nível de profundidade do solo e potencial gravitacional da água no solo. . .	[cm]
$\underline{z}_r$	- Profundidade total do sistema radicular	[cm]
$\underline{\alpha}$	- Expoente da curva de distribuição em massa do sistema radicular.	[0,01387]
$\underline{\gamma}$	- Constante psicrométrica.	[0,66 mb. ^o C ⁻¹]
$\underline{\Delta}$	- Tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água.	[mb. ^o C ⁻¹]
$\underline{\theta}$	- Umidade volumétrica do solo	[]
$\underline{v}$	- Coordenada radial.	[cm]
$\underline{v}_1$	- Raio médio das raízes	[0,01 cm]
$\underline{v}_2$	- Raio de influência das raízes	[cm]
$\underline{\xi}$	- Potencial matricial da água no solo . .	[cm]
$\underline{\rho}$	- Densidade do ar seco.	[1,29.10 ⁻³ g.cm ⁻³]
$\underline{\psi}_s, \underline{\psi}_r, \underline{\psi}_p$	- Potencial total da água no solo, na superfície das raízes e na planta [$\psi_s(z), \psi_r(z)$]	[cm]
$\underline{\omega}$	- Densidade de raízes	[g.cm ⁻³]

SIMULAÇÃO DA EXTRAÇÃO DE ÁGUA POR RAÍZES

Clóvis Angeli Sansigolo

Epaminondas Sansigolo de Barros Ferraz

- Orientador -

R E S U M O

Um modelo macroscópico, com função de extração analógica, é implementado visando a simulação, em condições de campo e durante um ciclo de secamento, do potencial da água na planta e das resistências médias do solo e das raízes. O conhecimento da localização e magnitude das resistências ao fluxo líquido no sistema solo-planta é fundamental na descrição da resposta da planta ao estresse hídrico. Conclui-se que a maior resistência ao fluxo está nas raízes e a resistência do solo só se torna significativa quando sua umidade se aproxima da exaustão. Os resultados apresentados podem ser usados como um meio efetivo para a seleção dos parâmetros físicos a serem controlados em práticas agrícolas. O modelo possibilita a extensão desses resultados para outras condições e pode, então, ser usado como modelo de previsão. Ele pode ser facilmente incorporado num modelo mais amplo para as relações hídricas, fotossínteses, crescimento e produção de uma cultura.

SIMULATION OF WATER EXTRACTION BY ROOTS

Clóvis Angeli Sansigolo

Epaminondas Sansigolo de Barros Ferraz

- Adviser -

S U M M A R Y

A simulation of plant water potencial and soil and root average resistances, using a macroscopic model with an analogic extraction function, is improved. The model is applied for field conditions during a drying cycle. The knowledge of location and magnitude of the resistances to liquid flow is fundamental in the plant response description to water stress. It is suggested that the biggest resistance to the flow is in the roots. The soil resistance becomes important when its humidity is near to exhaustion. The present results show that some physical parameters may be effectively selected and controlled in agricultural practices. The model permits the extension of these results to other conditions and may be then used as a prediction model. It may easily be incorporated to a more general model taking into account the water relations, photosynthesis, growth and yield of a crop.

1. INTRODUÇÃO E REVISÃO DE LITERATURA

A extração de água pelas raízes das plantas é um dos principais componentes do balanço hídrico em solos vegetados. Um dos primeiros estudos quantitativos detalhados sobre o transporte de água do solo para as raízes foi o de GARDNER (1960). O seu modelo considera a raiz como um cilindro infinitamente longo, de raio constante e com propriedades uniformes de absorção de água, onde o fluxo radial em equilíbrio dinâmico é resolvido analiticamente. As idéias e os conceitos de Gardner foram aprimorados em trabalhos posteriores (GARDNER e EHLIG, 1962 e GARDNER, 1964, 65), tiveram grande repercussão e estimularam muitas pesquisas (COWAN, 1965; NEWMAN, 1969a,b; LANG e GARDNER, 1970; LAMBERT e DE VRIES, 1973; HANSEN, 1974a,b, 75; HILLEL *et alii*, 1975; TAYLOR e KLEPPER, 1975; REICOSKY e RITCHIE, 1976; BURCH, 1979; FEDERER, 1979 e ZUR e JONES, 1981). Mas, como discutido por MDLZ e REMSON (1970), não seria prático o desenvolvimento de modelos de transporte de água em solos contendo raízes, se o fluxo a cada raiz individual tivesse que ser considerado. A geometria detalhada do sistema radicular é praticamente impossível de ser medida e é de-

pendente do tempo. Além disso, a permeabilidade de uma raiz varia ao longo do seu comprimento (KRAMER, 1969). Consequentemente, a maioria das funções de extração tem sido desenvolvidas usando aproximações macroscópicas em oposição às microscópicas (MOLZ e REMSON, 1971; FEODES e RIJTEMA, 1972; NIMAH e HANKS, 1973a,b; FEODES *et alii*, 1974; HILLEL *et alii*, 1976; ROWSE *et alii*, 1978; BELMANS *et alii*, 1979; BAKEL, 1981 e BELMANS *et alii*, 1983). A idéia de se usar uma função de extração para representar a absorção de água pelas raízes surgiu a partir dos trabalhos de GARDNER (1964), RIJTEMA (1965), ROSE e STERN (1967), VAN BAVEL *et alii* (1968) e WHISLER *et alii* (1968). Foram MOLZ e REMSON (1970) que propuseram a combinação da equação da continuidade com um sumidouro difuso representando a extração de água pelas raízes.

Na maioria dos casos, a diferença mais importante entre os vários modelos que tem sido desenvolvidos para simular o transporte de água em solos vegetados é a forma selecionada para as funções de extração. (As principais funções de extração estão incluídas no Apêndice 1). Diversas dessas funções, incluindo as usadas por MOLZ e REMSON (1970), FEODES *et alii* (1976), RAATS (1976) e BELMANS *et alii* (1983) são de natureza empírica. Outras, como as de GARDNER (1964), WHISLER *et alii* (1968), NIMAH e HANKS (1973a,b), FEODES *et alii* (1974), HILLEL *et alii* (1976), HERKELRATH *et alii* (1977a,b), ROWSE *et alii* (1978) e MOLZ (1981), são semi-empíricas. Muitas implicitamente assumem que a resistência dominante ao fluxo de água no sistema solo-raiz, reside no solo em torno da raiz e não nos tecidos radiculares (GARDNER, 1964; WHISLER *et alii*, 1968; MOLZ

e REWSON, 1970; NIMAH e HANKS, 1973a,b e FEDDES *et alii*, 1974). NEWMAN (1969a,b, 73), MOLZ (1975, 76), ARYA *et alii* (1975), TAYLOR e KLEPPER (1975), NNYAMAH *et alii* (1978), ROWSE *et alii* (1978), MEYER *et alii* (1978), BLIZZARD e BOYER (1980) e SAMUI e KAR (1981) apresentam evidências teóricas e experimentais mostrando que a resistência hidráulica do sistema radicular frequentemente domina a resistência do solo imediatamente ao redor das raízes. Embora ainda haja controvérsia quanto ao grau de dominância da resistência das raízes (MOLZ, 1981), parece certo que esta domina numa grande faixa de umidade do solo, sob condições normais de exploração pelo sistema radicular. Se se considera essa afirmação como verdadeira, conclue-se que todas as funções de extração expressas somente em termos das propriedades hidráulicas do solo são conceitualmente erradas. Somente as funções de NIMAH e HANKS (1973a,b), HILLEL *et alii* (1976), HERKELRATH *et alii* (1977a,b), ROWSE *et alii* (1978) e MOLZ (1981) são parcialmente consistentes com o conhecimento atual da hidráulica do sistema solo-raiz.

O conhecimento da localização e magnitude das resistências ao fluxo de água no sistema solo-planta é fundamental na descrição da resposta da planta ao estresse hídrico, pois embora o controle sobre a perda de água resida na fase de vapor, as resistências do solo e da planta afetam as taxas de transpiração através de sua influência no potencial da água na folha é portanto na abertura estomatal.

O objetivo deste trabalho foi o de simular em condições de

.4.

campo através de um modelo macroscópico, o comportamento global do sistema solo-planta visando examinar certas interrelações fundamentais ainda não suficientemente esclarecidas como a importância relativa das resistências do solo e da planta e sua influência no potencial da água na planta e na transpiração, durante um ciclo de secamento. Por outro lado, procurou-se um melhor entendimento, em termos quantitativos, da disponibilidade de água às plantas visando a melhoria e a otimização dos aspectos agronômicos, hidrológicos e ambientais do manejo de água no solo.

2. TEORIA

Em princípio, duas aproximações alternativas são adotadas na modelagem físico-matemática da extração de água do solo pelas raízes das plantas. A primeira baseia-se nas propriedades integradas do sistema radicular explorando um volume de solo significativo e a segunda concentra-se nas propriedades de uma raiz simples.

Na aproximação integrada ou macroscópica, o sistema radicular é considerado como um sumidouro de água simplesmente adicionado à equação da continuidade (GARDNER, 1964; RIJTEMA, 1965; ROSE e STERN, 1967; VAN BAVEL *et alii*, 1968; WHISLER *et alii*, 1968; MOLZ e REMSON, 1970; FEODES e RIJTEMA, 1972; NIMAH e HANKS, 1973a,b; FEODES *et alii*, 1974; KOWALIK e ZARADNY, 1974; NEUMAN *et alii*, 1975; FEODES *et alii*, 1976; HILLEL *et alii*, 1976; SLACK *et alii*, 1977; DE JONG e CAMERON, 1978; ROWSE *et alii*, 1978; BELMANS *et alii*, 1979; HAYHOE, 1981; HOOGLAND *et alii*, 1981; VAN BAVEL, 1981 e BELMANS, 1983):

$$\partial \theta / \partial t = - \nabla \cdot q - q_r \dots \dots \dots (1)$$

onde, θ é a umidade volumétrica do solo, t o tempo, q_r o termo de extração de água pelas raízes e q as densidades de fluxo de água no solo, comumente descritas pela equação de Darcy:

$$q = -K \nabla \psi_s \quad (2)$$

onde K é a condutividade hidráulica e ψ_s o potencial total da água do solo.

Combinando-se (1) e (2) tem-se a equação diferencial básica para o fluxo de água no solo e extração pelas raízes:

$$\partial \theta / \partial t = \nabla \cdot (K \nabla \psi_s) - q_r \quad (3)$$

Considerando-se um fluxo unidimensional, na direção vertical, e o potencial total da água ψ_s em função de seus dois componentes principais, o potencial matricial ξ e o gravitacional z ($\psi_s = \xi - z$), a equação (3) torna-se:

$$\partial \theta / \partial t = \partial / \partial z [K (\partial \xi / \partial z) - K] - q_r \quad (4)$$

Todos os modelos de extração de água pelas raízes são baseados na equação (4) ou na sua forma equivalente:

$$\partial \theta / \partial t = \partial / \partial z [D \partial \theta / \partial z] - \partial K / \partial z - q_r \quad (5)$$

onde D é a difusividade hidráulica do solo, representada por $K \partial \xi / \partial \theta$.

No modelo da raiz simples ou microscópico, esta é tomada como um cilindro infinitamente longo, de raio constante e com proprieda-

des uniformes de absorção de água (PHILIP, 1957; GARDNER, 1960; VISSER, 1964; COWAN, 1965; NEWMAN, 1969a,b; LAMBERT e DE VRIES, 1973; HANSEN, 1974a,b, 75; HILLEL *et alii*, 1975; TAYLOR e KLEPPER, 1975; REICOSKY e RITCHIE, 1976; BURCH, 1979; FEDERER, 1979 e ZUR e JONES, 1981). Neste caso, o termo de extração q_r não aparece, e a equação (3), em coordenadas cilíndricas, supondo geometria radial na direção horizontal, torna-se:

$$\partial \theta / \partial t = 1/v \partial / \partial v (v K \partial \psi_s / \partial v) \dots \dots \dots (6)$$

onde, v é a coordenada radial.

Em condições de equilíbrio dinâmico, com a água fluindo de uma distância v_2 para as raízes de raio v_1 e supondo-se K constante tem-se como solução analítica para (6) (PHILIP, 1957 e GARDNER, 1960):

$$q'_r = - [2 \pi K (\psi_r - \psi_s)] / \ln (v_2/v_1) \dots \dots \dots (7)$$

onde q'_r é a taxa de extração de água por unidade de comprimento de raiz, ψ_r e ψ_s são, respectivamente, os potenciais totais da água na superfície das raízes e no solo.

O modelo da raiz simples (equação 7) pode ser estendido para um sistema radicular completo, desde que uniforme (GARDNER, 1960; GARDNER e EHLIG, 1962 e GARDNER, 1965), através de:

$$q_r = q'_r \ell_r z_r \dots \dots \dots (8)$$

onde, q_r é a taxa global de extração de água pelas raízes, ℓ_r o compri-

mento de raiz por unidade de volume de solo e $\underline{z}_r$ a profundidade do solo explorada pelo sistema radicular.

A extração de água pelas raízes pode também ser expressa analogicamente à lei de Ohm, através do modelo de VAN DEN HONERT (1948) (GARDNER e EHLIG, 1962; GARDNER, 1964; COWAN, 1965; NEWMAN, 1969 a,b; FEDDES e RIJTEMA, 1972; FEDDES *et alii*, 1974; HANSEN, 1974a,b, FEDDES *et alii*, 1975; HILLEL *et alii*, 1976; REICDSKY e RITCHIE, 1976; BURCH e JOHNS, 1972; ROWSE *et alii*, 1978; BELMANS *et alii*, 1979; BURCH, 1979; FEDERER, 1979; BLIZZARD e BOYER, 1980; HOOGLAND *et alii*, 1981; VAN BAVEL, 1981 e ZUR e JDNES, 1981). Considerando-se um fluxo unidimensional em equilíbrio dinâmico, tem-se:

$$q_r = - (\psi_r - \psi_s) / r_s = - (\psi_p - \psi_r) / r_r \dots \dots \dots (9)$$

onde $\underline{\psi}_r$ e $\underline{\psi}_s$ são os potenciais totais da água na superfície das raízes e no solo, já definidos anteriormente, e $\underline{\psi}_p$ é o potencial total da água na planta num ponto, presumivelmente na base do caule, para onde todas as raízes convergem e a planta emerge com um único potencial. $\underline{r}_r$ é a resistência global das raízes ao fluxo líquido, um termo muito difícil de ser determinado quantitativamente, que pode ser subdividida, segundo HILLEL *et alii* (1976), numa resistência à absorção ("resistência de entrada") e outra à condução ("resistência do xilema"). $\underline{r}_s$ é a resistência do solo, que pode ser obtida através da combinação das equações (7) e (8):

$$q_r = - (\psi_r - \psi_s) / (b/K) \dots \dots \dots (10)$$

onde $\underline{b}$ é um parâmetro relacionado ao comprimento e a geometria do sistema radicular. $\underline{b}$ é inversamente proporcional à área específica da interface solo-raiz e diretamente proporcional à resistência (FEDDES e RIJTEMA, 1972; FEDDES *et alii*, 1974, 76 e NEUMAN *et alii*, 1975):

$$b = \ln(v_2/v_1) / 2 \pi \ell_r z_r \dots \dots \dots (11)$$

Supõem-se na equação (11) uma distância mútua entre raízes suficientemente grande para evitar interferência e prevailecimento das condições de equilíbrio dinâmico. Pode-se observar, por comparação da equação (10) com o primeiro termo da equação (9) que $\underline{b/K}$ é a resistência do solo $\underline{r_s}$.

Como ainda não é possível a medida do potencial total da água na superfície das raízes, geralmente faz-se uso de uma expressão equivalente à (9), que pode ser aplicada ao sistema radicular como um todo ou as camadas horizontais discretas (FEDDES e RIJTEMA, 1972; HILLEL *et alii*, 1976; ROWSE *et alii*, 1978; BELMANS *et alii*, 1979; HOOGLAND *et alii*, 1981 e VAN BAKEL, 1981):

$$q_r = - (\psi_p - \psi_s) / (r_r + r_s) \dots \dots \dots (12)$$

O modelo implementado no presente trabalho é desenvolvido a partir da equação (4), onde o termo de extração é dado, para cada profundidade $\underline{z}$, pela equação (12):

$$\partial \theta / \partial t = \partial / \partial z [K (\partial \xi / \partial z) - K] + [\psi_p - \psi_s(z)] / [r_r(z) + r_s(z)] \dots (13)$$

Para um certo intervalo de tempo, a taxa global de extração de água pelas raízes pode ser determinada aplicando-se a equação de conservação da massa ao volume de solo explorado pelo sistema radicular (RIJTEMA, 1965 e ROSE e STERN, 1967). Supondo-se um fluxo unidimensional, na direção vertical, tem-se:

$$\int_0^{z_r} \int_{t_1}^{t_2} q_r(z) dz dt = \int_{t_1}^{t_2} [p - ev + q_{z_r}] dt - \int_0^{z_r} \int_{t_1}^{t_2} (\partial\theta/\partial t) dz dt \quad (14)$$

onde $\underline{p}$ e $\underline{ev}$ são, respectivamente, as taxas de precipitação e evaporação na superfície do solo e $\underline{q_{z_r}}$ os fluxos verticais, computados pela equação de Darcy no limite inferior do sistema radicular.

O volume de água extraído pelas raízes de uma camada de solo compreendida entre dois planos horizontais às profundidades $\underline{z_1}$ e $\underline{z_2}$ pode ser obtido a partir de (14):

$$\int_{z_1}^{z_2} \int_{t_1}^{t_2} q_r(z) dz dt = \int_{t_1}^{t_2} (q_{z_1} + q_{z_2}) dt - \int_{z_1}^{z_2} \int_{t_1}^{t_2} (\partial\theta/\partial t) dz dt. \quad (15)$$

onde os fluxos $\underline{q_r}(z)$ e $\underline{q_z}$, para simplicidade de cálculos, são geralmente expressos como valores médios para o período:

$$\bar{q}_r(z) = \int_{t_1}^{t_2} q_r(z) dt / (t_2 - t_1) \quad (16)$$

$$\bar{q}_z = \int_{t_1}^{t_2} q_z dt / (t_2 - t_1) \quad (17)$$

A partir das taxas médias de extração pelas raízes às diferentes profundidades $\bar{q}_r(z)$, durante um ciclo de secamento, pode-se fazer uma análise quantitativa da magnitude e variação das resistências do solo e das raízes, além do potencial total da água na planta. Com esse objetivo, aplica-se a função (12) às várias profundidades z e, desse modo, para cada período, uma série de equações podem ser formuladas com os valores conhecidos de $\bar{q}_r(z)$, $\psi_s(z)$ e $1/K(z)$, para se determinar as três outras variáveis desconhecidas ψ_p , $b(z)$ e $r_r(z)$.

Supondo-se uma variação exponencial de $b(z)$ e $r_r(z)$ em profundidade, devido a um decréscimo exponencial em massa do sistema radicular, $\omega(z) = \omega(0) \exp(-\alpha z)$ (FEODES *et alii*, 1974), obtém-se:

$$b(z) = b(0) \exp(\alpha z) \dots \dots \dots (18)$$

$$r_r(z) = r_r(0) \exp(\alpha z) \dots \dots \dots (19)$$

Substituindo-se as equações (18) e (19) em (12), tem-se para cada profundidade z :

$$\bar{q}_r(z) = -[\psi_p - \psi_s] / [b(0) \exp(\alpha z) / K(z) + r_r(0) \exp(\alpha z)] \dots \dots (20)$$

que após rearranjo, torna-se:

$$- [\psi_s(z) / \bar{q}_r(z)] \exp(-\alpha z) = \psi_p / \bar{q}_r(z) \exp(-\alpha z) - b(0) / K(z) - r_r(0) \dots (21)$$

Aplicando-se a equação (21), do tipo $y = a_2 x_2 + a_1 x_1 + a_0$, a três ou mais níveis às profundidades z , tem-se a solução para as variáveis

veis ψ_p , $\underline{b}(0)$ e $\underline{r}_r(0)$.

Nos cálculos de resistência das raízes, supõem-se que as diferentes quantidades de água extraídas do solo às várias profundidades $\underline{z}$, fluem em direção aos tecidos foliares por caminhos mutuamente exclusivos, isto é, sem conexão. A resistência global pode ser computada levando-se em consideração as várias resistências encontradas em cada parte do sistema. Isso é feito integrando-se a equação (12) na profundidade total do sistema radicular $\underline{z}_r$:

$$\int_0^{\underline{z}_r} [\psi_p - \psi_r(z)] dz = \int_0^{\underline{z}_r} q_r(z) r_r(z) dz \dots \dots \dots (22)$$

Para o sistema radicular completo, tomando-se uma média vertical das variáveis, tem-se:

$$-(\psi_p - \bar{\psi}_r) / \bar{r}_r = \bar{q}_r(\bar{z}) \dots \dots \dots (23)$$

onde, $\bar{r}_r = \underline{z}_r \cdot \bar{R}_r$, pois:

$$-(\psi_p - \bar{\psi}_r) / \bar{r}_r = 1/\bar{r}_r \int_0^{\underline{z}_r} [\psi_p - \psi_r(z)] dz / \underline{z}_r \dots \dots \dots (24)$$

$$\bar{q}_r(\bar{z}) = \int_0^{\underline{z}_r} q_r(z) dz / \underline{z}_r \dots \dots \dots (25)$$

Segue-se que:

$$\bar{r}_r = \int_0^{\underline{z}_r} q_r(z) r_r(z) dz / \int_0^{\underline{z}_r} q_r(z) dz \dots \dots \dots (26)$$

onde a resistência média global das raízes $\bar{R}_r$ seria:

$$\bar{R}_r = \bar{r}_r / z_r \dots \dots \dots (27)$$

De modo análogo à derivação da resistência das raízes, uma expressão integrada pode ser desenvolvida para a resistência do solo:

$$\bar{r}_s = \int_0^{z_r} q_r(z) r_s(z) dz / \int_0^{z_r} q_r(z) dz \dots \dots \dots (28)$$

onde a resistência média global do solo $\bar{R}_s$ seria:

$$\bar{R}_s = \bar{r}_s / z_r \dots \dots \dots (29)$$

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

Os perfis de umidade volumétrica do solo usados nesse estudo foram os determinados por FERRAZ (1968) numa área totalmente coberta com grama batatais (*Paspalum notatum*, Flüggé) localizada próximo ao Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, em Piracicaba. Esses perfis, compostos com os valores médios de umidade volumétrica do solo a períodos de 3 dias e a intervalos de 20 cm até 200 cm de profundidade obtidos em triplicata com uma sonda de neutrons durante os meses de julho, agosto e setembro de 1967, são mostrados na Figura 1.

O solo da área é classificado como um Latossolo Vermelho Escuro cujas características físicas médias são:

profundidade = 220 cm

densidade global = $1,49 \pm 0,02 \text{ g.cm}^{-3}$

Composição granulométrica porcentual	[	areia = $35,15 \pm 1,16$
		limo = $19,47 \pm 0,84$
		argila = $45,38 \pm 0,80$

A curva de retenção de água e a condutividade hidráulica do solo, propriedades físicas relacionadas à dinâmica da água, foram determinadas a partir dos dados experimentais apresentados por FERRAZ (1968). A primeira, obtida em laboratório por secamento em "panela de pressão" e placa de Richards, é mostrada na Figura 2. A segunda, a condutividade hidráulica média do solo no sentido vertical, calculada pelo método de ROSE *et alii* (1965) através de medidas sucessivas de perfis de umidade em condições de campo, é mostrada na Figura 3.

Finalmente, a distribuição do sistema radicular em profundidade, obtida por FERRAZ (1968) através de amostragem de solo com anéis volumétricos, separação das raízes e pesagem, é mostrada na Figura 4.

3.2. Métodos

As taxas médias de extração de água pelas raízes para as diferentes profundidades e períodos $q_r(z)$, foram computadas a partir dos perfis de umidade volumétrica (θ) (Figura 1), usando as curvas de retenção de água no solo $\xi(\theta)$ (Figura 2) e condutividade hidráulica $K(\theta)$ (Figura 3), através do esquema numérico para a equação (15) que

Figura 2 - Curva de retenção de água no solo.

Figura 3 - Condutividade hidráulica do solo.

Figura 4 - Distribuição do sistema radicular no perfil de solo.

é mostrado na Figura 5. Conhecidos esses valores $\left[\underline{q}_r(z) \right]$, os potenciais totais da água $\underline{\psi}_s(z)$ e as condutividades hidráulicas do solo $\underline{K}_z(z)$, foram determinados; para cada período, através da equação (21), os potenciais da água na planta $\underline{\psi}_p$, a resistência das raízes $\underline{r}_r(0)$ e o parâmetro de comprimento e geometria do sistema radicular $\underline{b}(0)$, pela combinação das $\underline{n}$ equações formuladas para o período, três a três. As duas últimas variáveis $\left[\underline{b}(0) \text{ e } \underline{r}_r(0) \right]$ foram extendidas para os outros níveis através das equações (18) e (19), usando o expoente $\underline{\alpha}$ da função de distribuição das raízes no perfil de solo (Figura 4).

Calculadas as resistências das raízes $\underline{r}_r(z)$ e do solo $\underline{r}_s(z)$ para cada uma das $\underline{n}$ camadas, foram computadas, para cada período, através das aproximações numéricas para as equações (26) e (28), que se seguem, as resistências médias globais das raízes $\bar{R}_r$ e do solo $\bar{R}_s$:

$$r_{r,n} = \sum_{i=1}^n \bar{q}_{r,i}(z) \cdot r_{r,i} / \sum_{i=1}^n \bar{q}_{r,i}(z) \dots \dots \dots (30)$$

onde,

$$\bar{R}_r = r_{r,n} / n \dots \dots \dots (31)$$

$$r_{s,n} = \sum_{i=1}^n \bar{q}_{r,i}(z) \cdot r_{s,i} / \sum_{i=1}^n \bar{q}_{r,i}(z) \dots \dots \dots (32)$$

onde,

$$\bar{R}_s = r_{s,n} / n \dots \dots \dots (33)$$

$$\begin{aligned}
 \xi(\theta)_{i-1}^{j+1/2} &= \xi[(\theta_{i-1}^j + \theta_{i-1}^{j+1})/2] \\
 \xi(\theta)_i^{j+1/2} &= \xi[(\theta_i^j + \theta_i^{j+1})/2] \\
 \xi(\theta)_{i+1}^{j+1/2} &= \xi[(\theta_{i+1}^j + \theta_{i+1}^{j+1})/2] \\
 \kappa(\theta)_{i-1/2}^{j+1/2} &= \kappa[(\theta_i^j + \theta_{i-1}^j + \theta_i^{j+1} + \theta_{i-1}^{j+1})/4] \\
 \kappa(\theta)_{i+1/2}^{j+1/2} &= \kappa[(\theta_i^j + \theta_{i+1}^j + \theta_i^{j+1} + \theta_{i+1}^{j+1})/4] \\
 q_{i-1/2}^{j+1/2} &= -\kappa(\theta)_{i-1/2}^{j+1/2} + \kappa(\theta)_{i-1/2}^{j+1/2} [\xi(\theta)_{i-1}^{j+1/2} - \xi(\theta)_i^{j+1/2}] / \Delta z \\
 q_{i+1/2}^{j+1/2} &= -\kappa(\theta)_{i+1/2}^{j+1/2} + \kappa(\theta)_{i+1/2}^{j+1/2} [\xi(\theta)_{i+1}^{j+1/2} - \xi(\theta)_i^{j+1/2}] / \Delta z \\
 q_r_i^{j+1/2} &= [q_{i-1/2}^{j+1/2} + q_{i+1/2}^{j+1/2} - (\theta_i^{j+1} - \theta_i^j) \Delta z] / \Delta t
 \end{aligned}$$

Figura 5 - Esquema numérico usado nos cálculos das taxas médias de extração de água pelas raízes em função da profundidade e do tempo.

Calibrados os parâmetros do modelo, procedeu-se ao cálculo das taxas médias de extração de água pelas raízes para cada camada, assim como à taxa de extração global, em cada período, através de:

$$\bar{q}_{r,i} = - (\psi_p - \psi_{s,i}) / (r_{s,i} + r_{r,i}) \quad \dots \quad (34)$$

$$\bar{Q}_r = - (\psi_p - \bar{\psi}_s) / (\bar{R}_s + \bar{R}_r) = \sum_{i=1}^n \bar{q}_{r,i} \quad \dots \quad (35)$$

As taxas médias diárias de evapotranspiração potencial foram calculadas a partir das variáveis climáticas temperatura, umidade relativa, radiação solar líquida e velocidade do vento, registradas na estação meteorológica próxima ao local do experimento, pelo método combinado de Penman-Monteith (MONTEITH, 1975):

$$ETP = [\Delta R_n + \rho c_p (e_s - e) / r_a] / [L (\Delta + \gamma)] \quad \dots \quad (36)$$

onde, Δ é a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água, R_n a radiação solar líquida, ρ a densidade do ar, c_p o calor específico do ar a pressão constante, e_s e e , respectivamente, as pressões de saturação e atual do vapor d'água, L o calor latente de vaporização da água, γ a constante psicrométrica e r_a a resistência aerodinâmica da cultura à difusão de vapor d'água, calculada sob condições de atmosfera neutra, como:

$$r_a = 1 / K_{vk} u(h) \ln (h - d) / h_o \quad \dots \quad (37)$$

onde K_{vk} é a constante de Von Karman, $u(h)$ a velocidade do vento à altura h , d o deslocamento do plano zero e h_o o parâmetro de rugosidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As taxas médias de extração de água do solo em função da profundidade e do tempo, calculadas através de um balanço hídrico detalhado, para camadas de 20 cm até 200 cm de profundidade, a partir dos valores experimentais de umidade volumétrica (Tabela 1), potencial total da água (Tabela 2) e condutividade hidráulica do solo (Tabela 3), como descrito em 3.2., são mostradas na Tabela 4. Verifica-se nessa última tabela, duas camadas (30 - 50 e 50 - 70 cm) com contribuições negativas as taxas globais. Sendo essas taxas as proporcionais à densidade de raízes, umidade do solo e implicitamente ao potencial total e condutividade hidráulica médios na camada, não haviam razões aparentes para esse comportamento, como pode ser observado através da Figura 4 e Tabelas 1, 2 e 3. Portanto, isso pode ser seguramente atribuído à contribuições laterais que ocorreram durante todo o período do experimento devido à uma maior condutividade hidráulica do solo no sentido horizontal nessas camadas. Esses valores, que levariam a grandes erros no cômputo unidimensional do balanço hídrico global para o perfil, não foram considerados nos cálculos subsequentes.

Tabela 1: Valores experimentais de unidade volumétrica do solo em função da profundidade e do tempo.

TETA (CC H2O/CC SOLO)

PER	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
1	0.320	0.322	0.328	0.315	0.300	0.286	0.283	0.293	0.299	0.300
2	0.311	0.316	0.320	0.308	0.291	0.281	0.279	0.285	0.293	0.296
3	0.305	0.312	0.317	0.303	0.285	0.277	0.275	0.286	0.289	0.293
4	0.299	0.309	0.313	0.299	0.282	0.274	0.272	0.284	0.296	0.291
5	0.294	0.305	0.309	0.295	0.279	0.270	0.269	0.282	0.283	0.289
6	0.289	0.302	0.305	0.292	0.277	0.267	0.267	0.279	0.281	0.287
7	0.285	0.300	0.304	0.290	0.275	0.266	0.266	0.277	0.280	0.284
8	0.281	0.297	0.303	0.288	0.272	0.263	0.265	0.275	0.279	0.281
9	0.273	0.295	0.301	0.285	0.271	0.261	0.263	0.273	0.277	0.279
10	0.275	0.292	0.298	0.283	0.270	0.260	0.262	0.272	0.276	0.277
11	0.272	0.290	0.295	0.281	0.269	0.259	0.261	0.270	0.275	0.275
12	0.268	0.289	0.293	0.280	0.263	0.253	0.260	0.269	0.274	0.274
13	0.265	0.286	0.290	0.280	0.265	0.256	0.259	0.267	0.273	0.272
14	0.261	0.284	0.289	0.273	0.264	0.255	0.258	0.266	0.272	0.271
15	0.258	0.281	0.286	0.272	0.262	0.254	0.257	0.265	0.270	0.271
16	0.253	0.278	0.284	0.272	0.260	0.252	0.255	0.263	0.269	0.270
17	0.248	0.274	0.279	0.268	0.253	0.251	0.254	0.262	0.268	0.269
18	0.244	0.270	0.276	0.263	0.256	0.250	0.253	0.261	0.267	0.268
19	0.241	0.267	0.272	0.265	0.256	0.249	0.252	0.261	0.267	0.266
20	0.238	0.265	0.269	0.263	0.255	0.247	0.250	0.259	0.265	0.265
21	0.234	0.261	0.265	0.260	0.252	0.245	0.248	0.257	0.264	0.264
22	0.230	0.257	0.261	0.255	0.250	0.243	0.246	0.255	0.262	0.262
23	0.227	0.253	0.257	0.253	0.247	0.241	0.244	0.253	0.260	0.260
24	0.223	0.249	0.253	0.250	0.243	0.239	0.242	0.252	0.259	0.257
25	0.220	0.246	0.250	0.246	0.238	0.236	0.241	0.250	0.257	0.255
26	0.218	0.243	0.248	0.243	0.235	0.232	0.238	0.248	0.255	0.253
27	0.216	0.242	0.247	0.236	0.229	0.228	0.235	0.246	0.253	0.251
28	0.214	0.240	0.245	0.233	0.223	0.223	0.232	0.244	0.250	0.250
29	0.210	0.239	0.244	0.230	0.219	0.219	0.229	0.243	0.249	0.250

Tabela 2 - Potencial total médio da água no solo em função da profundidade e do tempo.

PSI (CM H2O)

PER	10-30	30-50	50-70	70-90	90-110	110-130	130-150	150-170	170-190
1	-540.	-501.	-448.	-676.	-1133.	-1681.	-1701.	-1387.	-1196.
2	-693.	-537.	-529.	-813.	-1437.	-1942.	-2091.	-1544.	-1386.
3	-847.	-657.	-589.	-935.	-1661.	-2175.	-2341.	-1642.	-1540.
4	-1018.	-736.	-667.	-1061.	-1830.	-2437.	-2580.	-1743.	-1688.
5	-1206.	-825.	-756.	-1187.	-1985.	-2733.	-2799.	-1890.	-1823.
6	-1380.	-895.	-819.	-1286.	-2120.	-2919.	-2939.	-2045.	-1910.
7	-1521.	-972.	-845.	-1372.	-2301.	-3118.	-3037.	-2130.	-1971.
8	-1811.	-1056.	-837.	-1488.	-2457.	-3387.	-3190.	-2323.	-2065.
9	-2005.	-1147.	-961.	-1614.	-2540.	-3560.	-3352.	-2438.	-2165.
10	-2221.	-1246.	-1058.	-1723.	-2625.	-3680.	-3464.	-2558.	-2235.
11	-2502.	-1310.	-1148.	-1810.	-2713.	-3805.	-3580.	-2685.	-2306.
12	-2819.	-1400.	-1246.	-1840.	-2899.	-4000.	-3700.	-2819.	-2381.
13	-3177.	-1522.	-1330.	-1902.	-3098.	-4205.	-3825.	-2959.	-2458.
14	-3580.	-1655.	-1420.	-2065.	-3257.	-4348.	-3954.	-3057.	-2578.
15	-4105.	-1831.	-1542.	-2281.	-3481.	-4571.	-4155.	-3210.	-2705.
16	-4870.	-2060.	-1732.	-2562.	-3722.	-4807.	-4368.	-3372.	-2793.
17	-5632.	-2357.	-1978.	-2739.	-3980.	-4970.	-4515.	-3464.	-2885.
18	-6405.	-2653.	-2223.	-2879.	-4115.	-5140.	-4668.	-3541.	-2931.
19	-7098.	-2888.	-2500.	-3130.	-4185.	-5406.	-4908.	-3660.	-3028.
20	-8003.	-3197.	-2811.	-3404.	-4475.	-5732.	-5247.	-3909.	-3178.
21	-9179.	-3662.	-3217.	-3894.	-4868.	-6184.	-5610.	-4175.	-3337.
22	-10350.	-4196.	-3682.	-4381.	-5296.	-6616.	-5999.	-4461.	-3561.
23	-11670.	-4808.	-4216.	-4767.	-5959.	-7078.	-6416.	-4688.	-3740.
24	-13158.	-5417.	-4747.	-5366.	-6939.	-7702.	-6748.	-4928.	-3929.
25	-14337.	-6001.	-5167.	-6356.	-7947.	-8671.	-7218.	-5267.	-4195.
26	-15355.	-6425.	-5437.	-7533.	-9259.	-9931.	-7987.	-5630.	-4481.
27	-16446.	-6763.	-5722.	-8485.	-11356.	-11571.	-8839.	-6019.	-4867.
28	-18230.	-7118.	-6021.	-9398.	-13456.	-13486.	-9784.	-6329.	-5200.

Tabela 3 - Condutividade hidráulica média do solo em função da profundidade e do tempo.

CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (CM/DIA)

PER	10-30	30-50	50-70	70-90	90-110	110-130	130-150	150-170	170-190
1	0.02939793	0.03980146	0.06135237	0.02079394	0.00520496	0.00184195	0.00184195	0.00337631	0.00543519
2	0.01535870	0.02581810	0.03811549	0.01236993	0.00271929	0.00124767	0.00104533	0.00249379	0.00352566
3	0.00913660	0.01906961	0.02815265	0.00837995	0.00184195	0.00092155	0.00077505	0.00209735	0.00260410
4	0.00567561	0.01408509	0.01991312	0.00592666	0.00142067	0.00086057	0.00059778	0.00176393	0.00200851
5	0.00368161	0.01040345	0.01408509	0.00437752	0.00114421	0.00050275	0.00048146	0.00142067	0.00161765
6	0.00260410	0.00837995	0.01134416	0.00352566	0.00096231	0.00042283	0.00042283	0.00114421	0.00142067
7	0.00184195	0.00674843	0.01040345	0.00296518	0.00077505	0.00035561	0.00038777	0.00096231	0.00130286
8	0.00130286	0.00543519	0.00913660	0.00238816	0.00065184	0.00028641	0.00034055	0.00080933	0.00114421
9	0.00100488	0.00437752	0.00735864	0.00192343	0.00059778	0.00025153	0.00029908	0.00071078	0.00100488
10	0.00077505	0.00352566	0.00567561	0.00161765	0.00054821	0.00023067	0.00027428	0.00062423	0.00052155
11	0.00057246	0.00309633	0.00457115	0.00142067	0.00050275	0.00021155	0.00025153	0.00034621	0.00084513
12	0.00042283	0.00260410	0.00368161	0.00136049	0.00042283	0.00018579	0.00023067	0.00048146	0.00077505
13	0.00031231	0.00209735	0.00305633	0.00124767	0.00032512	0.00016316	0.00021155	0.00042283	0.00071078
14	0.00023067	0.00168921	0.00260410	0.00100488	0.00028641	0.00014563	0.00019400	0.00038777	0.00062423
15	0.00016316	0.00130266	0.00205735	0.00077505	0.00026266	0.00013141	0.00017038	0.00034055	0.00054821
16	0.00010584	0.00096231	0.00154913	0.00057246	0.00022090	0.00011541	0.00014963	0.00029908	0.00050275
17	0.00007169	0.00068067	0.00105574	0.00048146	0.00018579	0.00010584	0.00013722	0.00027428	0.00046106
18	0.00005295	0.00050275	0.00080933	0.00042283	0.00017038	0.00009706	0.00012584	0.00026266	0.00044153
19	0.00004084	0.00040492	0.00059778	0.00034055	0.00016316	0.00008524	0.00011052	0.00024088	0.00040492
20	0.00003017	0.00031231	0.00044153	0.00027428	0.00013722	0.00007159	0.00009295	0.00020258	0.00035561
21	0.00002134	0.00022090	0.00031231	0.00019400	0.00011052	0.00006029	0.0000817	0.00017038	0.00031231
22	0.00001576	0.00015625	0.00022090	0.00014329	0.00008901	0.00005071	0.00006575	0.00014329	0.00026266
23	0.00001164	0.00011052	0.00015625	0.00011541	0.00006575	0.00004255	0.00005529	0.00012584	0.00023067
24	0.00000860	0.00008163	0.00011541	0.00008524	0.00004453	0.00003435	0.00004856	0.00011052	0.00020258
25	0.00000692	0.00006296	0.00009295	0.00005529	0.00003150	0.00002537	0.00004084	0.00009295	0.00017038
26	0.00000582	0.00005295	0.00008163	0.00003587	0.00002134	0.00001795	0.00003150	0.00007817	0.00014329
27	0.00000490	0.00004650	0.00007169	0.00002649	0.00001269	0.00001216	0.00002430	0.00006575	0.00011541
28	0.00000378	0.00004084	0.00006296	0.00002043	0.00000823	0.00000823	0.00001874	0.00005774	0.00009706

Tabela 4 - Taxas médias de extração de água pelas raízes calculadas através do balanço hídrico para as diversas camadas e diferentes períodos.

EXTRACAO PELAS RAIZES (cm/dia)

PER	10-30	30-50	50-70	70-90	90-110	110-130	130-150	150-170	170-190
1	0.0488	0.0479	-0.1527	0.0833	0.0777	0.0543	0.0403	0.0273	0.0177
2	0.0549	0.0156	-0.1133	0.0624	0.0649	0.0326	0.0376	0.0130	0.0202
3	0.0550	-0.0019	-0.1018	0.0546	0.0497	0.0221	0.0305	0.0025	0.0186
4	0.0554	-0.0094	-0.0775	0.0476	0.0406	0.0218	0.0291	0.0010	0.0216
5	0.0526	-0.0120	-0.0570	0.0399	0.0337	0.0223	0.0264	0.0025	0.0216
6	0.0578	-0.0052	-0.0418	0.0437	0.0371	0.0284	0.0305	0.0125	0.0246
7	0.0558	0.0020	-0.0465	0.0453	0.0363	0.0277	0.0282	0.0152	0.0199
8	0.0463	-0.0003	-0.0534	0.0400	0.0268	0.0211	0.0199	0.0099	0.0114
9	0.0433	0.0009	-0.0453	0.0378	0.0233	0.0209	0.0194	0.0101	0.0109
10	0.0402	0.0005	-0.0342	0.0328	0.0212	0.0205	0.0167	0.0112	0.0095
11	0.0331	-0.0096	-0.0316	0.0221	0.0135	0.0135	0.0113	0.0054	0.0021
12	0.0381	-0.0035	-0.0163	0.0221	0.0216	0.0195	0.0172	0.0129	0.0081
13	0.0290	-0.0075	-0.0202	0.0121	0.0155	0.0123	0.0098	0.0069	0.0010
14	0.0200	-0.0118	-0.0256	0.0063	0.0072	0.0050	0.0030	-0.0002	-0.0041
15	0.0241	-0.0029	-0.0170	0.0133	0.0123	0.0111	0.0094	0.0065	0.0037
16	0.0216	-0.0016	-0.0130	0.0128	0.0107	0.0105	0.0092	0.0069	0.0037
17	0.0189	-0.0001	-0.0030	0.0097	0.0105	0.0099	0.0091	0.0069	0.0097
18	0.0235	0.0077	0.0024	0.0142	0.0167	0.0164	0.0159	0.0134	0.0029
19	0.0157	0.0008	-0.0013	0.0073	0.0084	0.0099	0.0093	0.0066	0.0033
20	0.0144	0.0013	0.0008	0.0066	0.0080	0.0096	0.0090	0.0069	0.0103
21	0.0196	0.0090	0.0086	0.0137	0.0139	0.0154	0.0154	0.0138	0.0103
22	0.0184	0.0038	0.0097	0.0137	0.0136	0.0154	0.0152	0.0138	0.0163
23	0.0241	0.0172	0.0175	0.0195	0.0207	0.0215	0.0219	0.0203	0.0100
24	0.0168	0.0110	0.0112	0.0127	0.0145	0.0145	0.0149	0.0136	0.0100
25	0.0162	0.0115	0.0103	0.0136	0.0141	0.0145	0.0146	0.0136	0.0103
26	0.0159	0.0113	0.0104	0.0144	0.0139	0.0143	0.0145	0.0134	0.0106
27	0.0091	0.0052	0.0037	0.0078	0.0075	0.0075	0.0078	0.0065	0.0047
28	0.0023	-0.0014	-0.0029	0.0011	0.0009	0.0008	0.0011	-0.0005	-0.0013

A partir dos valores de potencial total da água no solo, condutividade hidráulica e extração de água pelas raízes foram determinados para cada período, como descrito em 3.2., os potenciais médios da água na planta, os parâmetros de comprimento e geometria do sistema radicular e as resistências das raízes. Os potenciais médios da água na planta estão incluídos na Tabela 9, enquanto os outros dois parâmetros, computados devido às suas pequenas variabilidades interperíodos pela média de todas as determinações como $\underline{b}(0) = 4,0 \pm 0,4$ cm e $\underline{r}_r(0) = 20140 \pm 2176$ dias, são mostrados em função da profundidade, adotando o modelo exponencial proposto, na Figura 6. A pequena variabilidade desses parâmetros já havia sido constatada em pastagem por RIJTEMA (1965) e seria válida para culturas cujo sistema radicular não mudasse muito em função do tempo.

Determinados esses parâmetros, foram calculados através dos potenciais médios da água no solo e na planta e das resistências médias do solo (Tabela 5) e da planta (Tabela 6) ou total (Tabela 7), usando a função de extração proposta (equação 34), as taxas médias de extração de água pelas raízes para o período do experimento, sendo os resultados apresentados na Tabela 8. Esses resultados reproduzem bem os originais utilizados no processo de calibração da função de extração (Tabela 4), exceto para as primeiras camadas não consideradas nesse processo pelas razões discutidas anteriormente. Observa-se na Tabela 8 que as camadas superiores são exauridas primeiro e as zonas com maiores taxas de extração movem-se gradualmente para as camadas mais profundas, comportamento semelhante ao encontrado por HILLEL *et alii* (1976) e BELMANS *et alii* (1979).

Figura 6 - Parâmetro de comprimento e geometria do sistema radicular e resistência das raízes em função da profundidade.

Tabela 5 - Resistência média do solo em função da profundidade e do tempo.

RESISTENCIA MEDIA DO SOLO (CIAS)

PER	10-30	30-50	50-70	70-90	90-110	110-130	130-150	150-170	170-190
1	180.	176.	150.	582.	3074.	11455.	15147.	10899.	8942.
2	345.	271.	241.	978.	5884.	16911.	26588.	14757.	13705.
3	580.	367.	327.	1444.	8686.	22836.	35598.	17546.	18663.
4	934.	497.	462.	2942.	11262.	10939.	46672.	20863.	24197.
5	1440.	673.	653.	2764.	13983.	41969.	57949.	25903.	30044.
6	2035.	835.	811.	3432.	16627.	49902.	65984.	32162.	34209.
7	2877.	1037.	884.	4081.	20644.	59335.	71951.	38241.	37303.
8	4063.	1298.	1007.	5067.	24546.	73671.	81927.	45470.	42475.
9	5274.	1599.	1250.	6291.	26766.	83886.	93287.	51774.	48364.
10	6838.	1935.	1621.	7430.	29186.	91471.	101722.	58953.	52737.
11	9258.	2261.	2013.	8517.	31825.	99742.	110920.	67127.	57506.
12	12535.	2688.	2499.	8994.	37840.	113372.	120950.	76435.	62706.
13	16970.	3338.	2971.	9698.	49062.	129319.	131886.	87033.	68375.
14	22976.	4144.	3533.	12041.	55864.	141013.	143812.	94903.	77857.
15	32483.	5373.	4386.	15632.	60916.	160565.	163752.	108062.	88652.
16	50076.	7274.	5939.	21137.	72430.	182328.	186457.	123045.	96663.
17	73928.	10284.	8396.	25332.	86121.	199360.	203317.	134171.	105409.
18	100090.	13923.	11367.	28617.	93908.	217367.	221702.	140106.	110071.
19	129770.	17287.	15390.	35331.	98062.	247528.	252442.	152775.	120024.
20	175694.	22414.	20837.	44116.	116598.	294317.	300159.	181652.	136667.
21	248392.	31688.	29459.	62370.	144770.	349949.	356896.	215989.	155616.
22	336295.	44800.	41647.	84442.	179748.	416957.	424357.	256815.	185031.
23	455305.	63337.	58880.	104845.	243359.	494749.	504570.	292424.	210687.
24	616432.	89751.	79717.	141948.	359273.	614288.	574532.	332970.	239900.
25	765372.	111179.	98977.	218828.	507931.	831677.	683131.	395909.	285246.
26	910644.	132194.	112701.	337348.	749863.	1175802.	885705.	470745.	339164.
27	1082062.	150524.	128328.	456330.	1260526.	1735848.	1148349.	559726.	421111.
28	1402933.	171395.	146121.	592168.	1943240.	2562648.	1488876.	617335.	500710.

Tabela 6 - Resistência média das raízes em função da profundidade e do tempo.

RESISTENCIA DAS RAIZES (CIAS)

PER	10-30	30-50	50-70	70-90	90-110	110-130	130-150	150-170	170-190
1	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
2	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
3	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
4	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
5	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
6	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
7	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
8	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
9	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
10	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
11	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
12	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
13	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
14	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
15	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
16	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
17	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
18	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
19	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
20	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
21	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
22	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
23	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
24	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
25	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
26	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
27	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.
28	26579.	35076.	46289.	61088.	80617.	106390.	140402.	185287.	244523.

Tabela 7 - Resistência média total em função da profundidade e do tempo.

RESISTENCIA MEDIA TOTAL (CIAS)

PER	10-30	30-50	50-70	70-90	90-110	110-130	130-150	150-170	170-190
1	26759.	35252.	46439.	61570.	83691.	117845.	155549.	196186.	253465.
2	26924.	35347.	46530.	62056.	84501.	123301.	166990.	200044.	258303.
3	27159.	35443.	46616.	62532.	89303.	129285.	176400.	202833.	263186.
4	27513.	35573.	46751.	63130.	91879.	137389.	187074.	206150.	268720.
5	28019.	35749.	46942.	63452.	94600.	148359.	198351.	211190.	274567.
6	28614.	35911.	47100.	64320.	97244.	156232.	206386.	217449.	278732.
7	29456.	36113.	47173.	65169.	101261.	165725.	212353.	223528.	281826.
8	30647.	36364.	47296.	66155.	105163.	180061.	222329.	230757.	286998.
9	31853.	36675.	47539.	67379.	107383.	190276.	233689.	237061.	292887.
10	33417.	37061.	47510.	68560.	109803.	197881.	242124.	244240.	297260.
11	35237.	37337.	48302.	69805.	112442.	206132.	251322.	252414.	302029.
12	35114.	37764.	48788.	69882.	118457.	219962.	261352.	261722.	307229.
13	43549.	38414.	49260.	70786.	129679.	235709.	272288.	272320.	312899.
14	49555.	39220.	49822.	73129.	136481.	247403.	294214.	280190.	322380.
15	59062.	40449.	50675.	76700.	141533.	266955.	304156.	293349.	333175.
16	76655.	42350.	52223.	82225.	153047.	289218.	326859.	308332.	341191.
17	100507.	45360.	54635.	88220.	165733.	305750.	343719.	319458.	345932.
18	126669.	48999.	57656.	85705.	174525.	323777.	362104.	325393.	354594.
19	156349.	52363.	61679.	96619.	178679.	353918.	392344.	338062.	364547.
20	202273.	57490.	67126.	105204.	197215.	400707.	440561.	366939.	381190.
21	274971.	66764.	75747.	123458.	225387.	456339.	497298.	401276.	400139.
22	362874.	79876.	87536.	145330.	260365.	522487.	564759.	442102.	429554.
23	481884.	98413.	105169.	165233.	323976.	601139.	644972.	477711.	455210.
24	543011.	120827.	126006.	203036.	439890.	720678.	714934.	513257.	484423.
25	791951.	146255.	145266.	275916.	588548.	938667.	823533.	581196.	529769.
26	936623.	167270.	158590.	398436.	830480.	1282192.	1026107.	656032.	583687.
27	1108641.	185630.	174617.	517818.	1341143.	1842238.	1288751.	745013.	665634.
28	1429512.	206471.	192410.	653256.	2023857.	2669038.	1629278.	822622.	745233.

Tabela 8 - Taxas médias de extração de água pelas raízes calculadas através dos potenciais médios da água no solo e na planta e das resistências médias do solo e das raízes para as diversas camadas e diferentes períodos.

EXTRAÇÃO PELAS RAÍZES (CM/ORA)

PER	10-30	30-50	50-70	70-90	90-110	110-130	130-150	150-170	170-190
1	0.1792	0.1372	0.1053	0.0756	0.0502	0.0310	0.0234	0.0201	0.0163
2	0.1647	0.1284	0.0988	0.0695	0.0426	0.0258	0.0182	0.0179	0.0145
3	0.1628	0.1301	0.1004	0.0693	0.0404	0.0239	0.0166	0.0179	0.0142
4	0.1433	0.1187	0.0918	0.0618	0.0341	0.0184	0.0127	0.0156	0.0122
5	0.1373	0.1133	0.0916	0.0606	0.0324	0.0156	0.0114	0.0150	0.0118
6	0.1629	0.1433	0.1109	0.0737	0.0403	0.0200	0.0150	0.0184	0.0148
7	0.1543	0.1427	0.1120	0.0730	0.0378	0.0182	0.0146	0.0177	0.0147
8	0.1134	0.1154	0.0930	0.0574	0.0265	0.0106	0.0094	0.0128	0.0112
9	0.1062	0.1156	0.0931	0.0560	0.0265	0.0098	0.0087	0.0124	0.0110
10	0.0960	0.1127	0.0912	0.0541	0.0255	0.0088	0.0091	0.0118	0.0107
11	0.0532	0.0830	0.0675	0.0373	0.0151	0.0029	0.0033	0.0068	0.0070
12	0.0737	0.1139	0.0914	0.0552	0.0237	0.0077	0.0077	0.0110	0.0108
13	0.0349	0.0826	0.0684	0.0395	0.0115	0.0021	0.0032	0.0064	0.0072
14	0.0142	0.0670	0.0575	0.0303	0.0067	-0.0003	0.0012	0.0044	0.0053
15	0.0195	0.0846	0.0732	0.0388	0.0125	0.0026	0.0036	0.0070	0.0077
16	0.0098	0.0840	0.0744	0.0372	0.0124	0.0028	0.0038	0.0073	0.0083
17	0.0016	0.0768	0.0706	0.0360	0.0112	0.0028	0.0039	0.0074	0.0084
18	0.0021	0.1001	0.0926	0.0522	0.0197	0.0075	0.0080	0.0123	0.0131
19	0.0049	0.0657	0.0620	0.0331	0.0120	0.0026	0.0036	0.0079	0.0090
20	0.0057	0.0637	0.0603	0.0328	0.0121	0.0027	0.0037	0.0080	0.0097
21	0.0033	0.0690	0.0667	0.0354	0.0151	0.0046	0.0053	0.0102	0.0123
22	0.0032	0.0625	0.0626	0.0330	0.0149	0.0049	0.0056	0.0107	0.0131
23	0.0013	0.0763	0.0771	0.0455	0.0195	0.0087	0.0092	0.0180	0.0188
24	0.0026	0.0504	0.0537	0.0303	0.0104	0.0053	0.0067	0.0127	0.0156
25	0.0014	0.0496	0.0557	0.0246	0.0090	0.0049	0.0073	0.0137	0.0171
26	0.0001	0.0538	0.0629	0.0198	0.0074	0.0043	0.0073	0.0149	0.0188
27	0.0023	0.0383	0.0467	0.0104	0.0019	0.0013	0.0039	0.0105	0.0135
28	0.0028	0.0342	0.0424	0.0073	0.0003	0.0003	0.0027	0.0095	0.0120

Tabela 9 - Taxas globais médias de extração de água pelas raízes em função dos potenciais totais da água nas diversas partes do sistema e das resistências médias globais.

PERÍODO	POTENCIAIS MÉDIOS DA ÁGUA				RESISTÊNCIAS MÉDIAS			EXTRAÇÃO	
	SOLO	SUP.-RAÍZES (CM)	PLANTA	SOLO	RAÍZES (CIAS)	TOTAL		PELAS	RAÍZES (CM/DIA)
1	-1029.	-1179.	-5336.	234.	6513.	6748.			0.6383
2	-1225.	-1427.	-5126.	348.	6374.	6722.			0.5804
3	-1376.	-1637.	-5268.	454.	6309.	6762.			0.5755
4	-1530.	-1810.	-4960.	552.	6194.	6746.			0.5085
5	-1689.	-2024.	-5054.	678.	6133.	6811.			0.4940
6	-1813.	-2318.	-6041.	844.	6212.	7056.			0.5993
7	-1931.	-2499.	-6127.	972.	6202.	7174.			0.5849
8	-2074.	-2548.	-5287.	1051.	6070.	7121.			0.4512
9	-2198.	-2722.	-5387.	1194.	6068.	7262.			0.4392
10	-2312.	-2876.	-5430.	1345.	6092.	7437.			0.4192
11	-2429.	-2777.	-4409.	1260.	5910.	7170.			0.2762
12	-2567.	-3253.	-5703.	1736.	6201.	7536.			0.3951
13	-2731.	-3149.	-4697.	1632.	6055.	7687.			0.2557
14	-2892.	-3170.	-4283.	1494.	5978.	7471.			0.1862
15	-3098.	-3577.	-5254.	2321.	6324.	8645.			0.2494
16	-3365.	-4048.	-5618.	2847.	6543.	9390.			0.2399
17	-3621.	-4354.	-5841.	3352.	6798.	10150.			0.2187
18	-3840.	-5314.	-7560.	4686.	7139.	11826.			0.3146
19	-4039.	-4939.	-6326.	4448.	7266.	11714.			0.1910
20	-4445.	-5468.	-6857.	5466.	7419.	12865.			0.1872
21	-4903.	-6509.	-8270.	7922.	7709.	15630.			0.2154
22	-5393.	-7549.	-9185.	10563.	8012.	18575.			0.2041
23	-5927.	-10050.	-12319.	15127.	8326.	23453.			0.2726
24	-6548.	-9092.	-11508.	18330.	8659.	27189.			0.1624
25	-7240.	-11612.	-13255.	24201.	9098.	33295.			0.1806
26	-8004.	-13716.	-15432.	30174.	9064.	39238.			0.1893
27	-8896.	-12744.	-13874.	30975.	9102.	40070.			0.1242
28	-9892.	-13207.	-14171.	31317.	9104.	40421.			0.1059

A Figura 7 ilustra as contribuições relativas das resistências médias do solo e das raízes para a total, em função do tempo e do potencial médio da água no solo. Verifica-se que a resistência média das raízes predomina até um potencial da água no solo aproximadamente igual a 5000 cm, havendo após uma inversão com a predominância da resistência do solo. Esses resultados estão coerentes com os obtidos por REICOSKY e RITCHIE (1976), HERKELRATH *et alii* (1977a, b), SEATON (1977), BRUNINI (1979), BURCH (1979), FEDERER (1979), JONES *et alii* (1982) e ZUR *et alii* (1982).

Resultados sugerindo que a resistência do solo é o fator dominante sobre as taxas de extração de água pelas raízes (GARDNER, 1960; GARDNER e EHLIG, 1962, 63; COWAN, 1965; MACKLON e WEATHER, 1965; WHISLER *et alii*, 1968; YANG e DE JONG, 1971; NIMAH e HANKS, 1973 e ROWSE *et alii*, 1978), assim como mostrando que a resistência das raízes predomina em toda faixa de água disponível (ANDREWS e NEWMAN, 1968; NEWMAN, 1969 a,b; BOYER, 1969, 71, 74; HANSEN, 1974a,b, 75; ARYA *et alii*, 1975; TAYLOR e KLEPPER, 1975 e DENMEAD e MILLAR, 1976) também são passíveis de serem obtidos e podem ser analisados através do efeito da condutividade hidráulica do solo e do comprimento efetivo de raízes sobre a resistência média do solo. Com esse objetivo, procedeu-se a um teste de sensibilidade a esses parâmetros usando valores dez vezes menores e dez vezes maiores do que os observados devido às suas grandes incertitudes, principalmente quando obtidos em condições de campo. Os resultados são apresentados na Tabela 10.

Figura 7 - Contribuição das resistências globais médias do solo e das raízes para a resistência total em função do tempo e do potencial total médio da água no solo.

Tabela 10 - Influência da condutividade hidráulica do solo e do comprimento efetivo de raízes sobre a resistência média do solo.

Potencial médio da água no solo ψ_s , cm	Resistência média das raízes $\bar{r}_r$, dias	0,1 $\frac{K}{\ell_r}$	$\frac{K}{\ell_r}$	10 $\frac{K}{\ell_r}$
		$\bar{r}_s = \frac{b}{K}$, dias		
500	3529	365	37	4
1000	4895	1876	188	19
2000	6260	<u>9628</u>	963	96
5000	8066	83694	<u>8369</u>	837
10000	9432	429660	42966	4297
15000	10231	1118665	111866	<u>11187</u>

Verifica-se na Tabela 10 que a resistência média das raízes que predominava a potenciais médios da água no solo menores do que 5000 cm, passa a predominar somente até potenciais de 2000 cm, quando se consideram os valores de condutividade hidráulica do solo ou densidade efetiva de raízes, dez vezes menores. Quando esses mesmos valores são aumentados de dez vezes, a resistência média das raízes passa a predominar em toda a faixa de potenciais médios da água no solo considerada, ou seja de 500 a 15000 cm. A condutividade hidráulica do solo e o comprimento efetivo de raízes tem comportamento semelhante pois são diretamente proporcionais.

A partir dos parâmetros médios de comprimento e geometria

do sistema radicular foram calculadas, de modo iterativo através da equação (11), as densidades efetivas e os raios dos cilindros de influência das raízes para as n camadas de solo consideradas. Esses valores, obtidos supondo-se o raio médio das raízes igual a 0,01 cm (HANSEN, 1974b), são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros de geometria do fluxo de água do solo para as raízes.

Camada de solo considerada Δ_z , cm	Parâmetro de comprimento e geometria do sistema radicular b , cm	Densidade efetiva de raízes ℓ_r , cm ⁻²	Raio do cilindro de influência das raízes $\underline{v}_2 = \pi \ell_r^{-1/2}$, cm
10 - 30	5,3	0,0095	5,8
30 - 50	7,0	0,0073	6,6
50 - 70	9,2	0,0057	7,5
70 - 90	12,1	0,0044	8,5
90 - 110	16,0	0,0034	9,7
110 - 130	21,1	0,0026	11,0
130 - 150	27,9	0,0020	12,5
150 - 170	36,8	0,0016	14,2
170 - 190	48,6	0,0012	16,2

Comparando-se os dados de densidade efetiva de raízes com os de densidade global reportados na literatura como valores médios para gramíneas (GARDNER, 1964; COWAN, 1965; NEWMAN, 1969 e BURCH e JOHNS, 1978), observa-se uma grande discrepância, também verificada por LANG e GARDNER

(1970). Uma das razões para essa discordância é que nem todas as raízes são efetivas na absorção de água, menos de 10% no presente estudo, valor adotado por HANSEN (1974b). Portanto, nos cálculos de extração de água pelas raízes através do modelo de uma raiz simples, deve-se levar em consideração esse fator de eficiência.

Os resultados de resistência das raízes comprovam tanto os de HAILEY *et alii* (1973), NEWMAN *et alii* (1973), JONES *et alii* (1982) e ZUR *et alii* (1982), mostrando que a resistência global das raízes é constante sobre uma grande faixa de fluxos transpiratórios, como os de MACKLON e WEATHERLY (1965), BOYER (1971, 74), RIJTEMA e ABOUKHALEO (1975) citados por SLABERS (1980), RITCHIE (1980) e ANGELOCCI (1983) mostrando que esta é constante numa faixa de fluxos e aumenta noutra, principalmente quando a umidade do solo se aproxima da exaustão. As resistências das raízes ao fluxo de água nas diversas camadas são constantes para os diversos períodos, como discutido anteriormente. A resistência média global das raízes é que varia em função de uma maior participação relativa das camadas mais profundas com maiores resistências que ocorre quando as zonas de maiores taxas de extração se movem para às camadas inferiores (equação 26).

A dependência da resistência das raízes com o fluxo transpiratório implica numa relação não linear para o gradiente de potencial da água entre o solo e a planta e o fluxo resultante através das raízes. Observa-se na Tabela 9 que as resistências globais médias das raízes são aproximadamente constantes até um potencial da água no solo igual a

3.600 cm, aumentando após esse ponto. Nessa faixa, o fluxo é diretamente proporcional ao gradiente de potencial entre o solo e a planta, como mostrado na Figura 8.

Na Figura 9, são apresentadas as taxas médias de evapotranspiração potencial (ETP), computadas pelo método de Penman-Monteith, assim como as de evapotranspiração real (ETR), tomadas como as taxas médias globais de extração pelas raízes, para o período do experimento. Observa-se que durante os 10 primeiros períodos do experimento, ETR excede ETP em cerca de 60% havendo após uma inversão que evidencia um controle sobre perda de água pela vegetação. Taxas de evapotranspiração real excedendo a potencial podem ser atribuídas principalmente à advecção de energia o que representa uma grande fonte de erro para a maioria dos modelos de transporte de água no sistema solo-planta-atmosfera onde ETP é tomada como condição de contorno.

O modelo implementado no presente trabalho ilustra a dinâmica da água e as interações complexas entre o solo, a planta e seu ambiente atmosférico na determinação da taxa de transpiração. Os resultados apresentados podem ser usados como um meio efetivo para a seleção dos parâmetros mais sensíveis a serem investigados em futuras pesquisas assim como aqueles a serem controlados em práticas culturais. Além disso, ele possibilita a extrapolação desses resultados em outras condições e pode ser usado na confecção de um modelo de previsão. Pode, também, ser facilmente incorporado num modelo mais amplo para as relações hídricas, fotossíntese, crescimento e produção de culturas, pois o crescimento, a pro

Figura 8 - Taxas globais médias de extração de água pelas raízes em função do gradiente de potencial da água entre o solo e a planta.

Figura 9 - Taxas médias de evapotranspiração potencial, computada pelo método de Penman-Monteith e de evapotranspiração real, tomada como a extração global pelas raízes, em função do tempo.

dução de matéria seca e a transpiração das plantas são processos fortemente correlacionados. Exemplos desses modelos globais são apresentados por FEDERER (1979) e ZUR e JONES (1982).

5. CONCLUSÕES

Do presente trabalho, conclue-se que:

- É realmente viável a utilização, em condições de campo, de um modelo macroscópico com uma função de extração analógica para se analisar a transferência de água no sistema solo-planta.

- O modelo implementado possibilita o conhecimento da dinâmica e das interações complexas entre o solo, a planta e seu ambiente atmosférico na determinação das taxas de transpiração.

- A maior resistência ao fluxo líquido está na planta, mais especificamente nas raízes, e a resistência do solo só se torna significativa quando a sua umidade se aproxima da exaustão.

- A resistência das raízes é constante numa grande faixa de fluxos transpiratórios e depois aumenta com seu decréscimo principalmente nos baixos teores de umidade do solo.

6. LITERATURA CITADA

- ANDREWS, R.E. e E.I. NEWMAN, 1969. Resistance to water flow in soil and plant. *New Phytol.* Cambridge, 68:1051-8.
- ANGELOCCI, L.R., 1983. Resposta de plantas jovens de *Coffea arabica* L. e de *Coffea canephora* Pierre, às variações do fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera. Campinas, IB/UNICAMP. 196 p. (Tese de Doutorado).
- ARYA, L.M.; G.R. BLAKE e D.A. FARREL, 1975. A field study of soil water depletion patterns in the presence of growing soybean roots. III. Rooting characteristics and root extraction of soil water. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* Madison, 39:437-44.
- BAKEL, P.J.T., 1981. Unsaturated zone and evapotranspiration. Wageningen, Inst. Land and Water Mgmt. Res. p.38-58 (Tech. Bull. 7).

- BELMANS, C.; J. FEYEN e D. HILLEL, 1979. An attempt at experimental validation of macroscopic-scale models of soil moisture extraction by roots. *Soil Sci.*, Baltimore, 127:174-86.
- BELMANS, C.; J.G. WESSELING e R.A. FEDDES, 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *J. Hydrol.* Amsterdam, 63:271-86.
- BLIZZARD, W.E. e J.S. BOYER, 1980. Comparative resistance of the soil and the plant to water transport. *Plant Physiol.* New York, 66:809-14.
- BOYER, J.S., 1969. Free energy transfer in plants. *Science*. Washington D.C., 163:1219-20.
- BOYER, J.S., 1971. Resistances to water transport in soybean, bean and sunflower. *Crop. Sci.* Madison, 11:403-7.
- BOYER, J.S., 1974. Water transport in plants: mechanism of apparent changes in resistance during absorption. *Planta*. Berlin, 117:187-207.
- BRUNINI, O., 1979. New devices for *in situ* measurements of soil and root water potentials and transport of water in the soil-plant system. University of Guelph. Canada, 144 p. [Ph.D. Thesis]
- BURCH, G.J. e G.G. JOHNS, 1978. Root absorption of water and physiological responses to water deficits by *Festuca arundinacea* Schreb and *Trifolium repens* L. *Aust. J. Plant. Physiol.* Melbourne, 5:859-71.

- BURCH, G.J., 1979. Soil and plant resistance to water absorption by plant root systems. *Aust. J. Agric. Res.* Melbourne, 30:279-92.
- COWAN, I.R., 1965. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. *J. Appl. Ecol.* Oxford, 2:221-39.
- DE JONG, R. e O.R. CAMERON, 1979. Computer simulation for predicting soil water content profiles. *Soil Sci.* Baltimore, 128:41-8.
- DENMEAD, D.T. e B.D. MILLAR, 1976. Water transport in wheat plants in the field. *Agron. J.* Madison, 68:297-311.
- FEDDES, R.A. e P.E. RIJTEMA, 1972. Water withdrawal by plant roots. *J. Hydrol.* Amsterdam, 17:33-59.
- FEDDES, R.A.; BRESLER, E. e S.P. NEUMAN, 1974. Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems. *Water Resour. Res.* Washington D.C., 10:1199-1206.
- FEDDES, R.A.; P.J. KOWALIK; S.P. NEUMAN e E. BRESLER, 1976. Finite difference and finite element simulation of field water uptake by plants. *Hydrol. Sci. Bull.* Beltsville, 21:81-98.
- FEDERER, C.A., 1979. A soil-plant-atmosphere model for transpiration and availability of soil water. *Water Resour. Res.* Washington D.C., 15:555-62.
- FERRAZ, E.S.B., 1968. Determinação da evapotranspiração real pela moderação de neutrons. Piracicaba, ESALQ/USP. 48 p. (Tese de Doutorado).

- GARDNER, W.R., 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci.* Baltimore, 89:63-73.
- GARDNER, W.R. e C.F. EHLIG, 1962. Some observations on the movement of water to plant roots. *Agron. J.* Madison, 54:453-56.
- GARDNER, W.R. e C.F. EHLIG, 1963. The influence of soil water on transpiration by plants. *J. Geophys. Res.* Washington D.C., 68:5719-24.
- GARDNER, W.R., 1964. Relations of root distribution to water uptake and availability. *Agron. J.* Madison, 56:41-5.
- GARDNER, W.R., 1965. Dynamic aspects of soil water availability to plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* Paolo Alto, 16:323-42.
- HAILEY, J.L.; E.A. HILER, W.R. JORDAN e C.H.M. VAN BAVEL, 1973. Resistance to water flow in *Vigna sinensis* L. (Endl.) at high rates of transpiration. *Crop. Sci.* Madison, 13:264-67.
- HANSEN, G.K., 1974a. Resistance to water transport in soil and young wheat plants. *Acta Agric. Scand.* Copenhagen, 24:37-48.
- HANSEN, G.K., 1974b. Resistance to water flow in soil and plants, plant water status, stomatal resistance and transpiration of Italian Ryegrass, as influenced by transpiration demand and soil water depletion. *Acta Agric. Scand.* Copenhagen, 24:83-92.

- HANSEN, G.K., 1975. A dynamic continuous simulation model of water state and transportation in the soil-plant-atmosphere system. I. The model and its sensitivity. *Acta Agric. Scand.* Copenhagen, 25:129-49.
- HAYHOE, H.N., 1981. Analysis of a diffusion model for plant root growth and an application to plant soil-water uptake. *Soil Sci.* Baltimore, 131:334-43.
- HERKELRATH, W.N.; E.E. MILLER e W.R. GARDNER, 1977a. Water uptake by plants: I. Divided root experiments. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* Madison, 41:1033-8.
- HERKELRATH, W.N.; E.E. MILLER e W.R. GARDNER, 1977b. Water uptake by plants. II. The root contact model. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* Madison, 41:1039-43.
- HILLEL, D.; C.G.E.M. VAN BEEK e H. TALPAZ, 1975. A microscopic scale model of soil water uptake and salt movement to plant roots. *Soil Sci.* Baltimore, 120:385-99.
- HILLEL, D.; H. TALPAZ e H. VAN KEULEN, 1976. A macroscopic scale model for water uptake by a non uniform root system and of water and salt movement in the soil profile. *Soil Sci.* Baltimore, 121:242-55.

- HOOGLAND, J.C.; R.A. FEDDES e C. BELMANS, 1981. Root water uptake model depending on soil water pressure head and maximum extraction rate. *Acta Hort.* The Hague, 119:123-36.
- JONES, J.W.; B. ZUR; K.J. BOOTE e L.C. HAMMOND, 1982. Plant resistance to water flow in field soybeans. I. Non limiting soil moisture. *Agron. J.* Madison, 74:92-8.
- KRAMER, P.J., 1969. *Plant and Soil Water Relationships. A Modern Synthesis.* Mc Graw-Hill, New York. 482p.
- LAMBERT, J.R. e F.W.T.P. DE VRIES, 1973. Dynamics of water in the soil-plant-atmosphere system: A model named TROIKA. In: HAOAS, A. ed. *Physical Aspects of Soil Water and Salts in Ecosystems.* Berlin, Springer-Verlag. p.257-72.
- LANG, A.R.G. e W.R. GARDNER, 1970. Limitation to water flux from soils to plants. *Agron. J.* Madison, 62:693-5.
- MACKLON, A.E.S. e P.E. WEATHERLEY, 1965. Controlled environment studies of the nature and origin of water deficits in plants. *New Phytol.* Cambridge, 64:414-27.
- MEYER, W.S.; E.L. GREACEN e A.M. ALSTON, 1978. Resistance to water flow in the seminal roots of wheat. *J. Exp. Bot.* Oxford, 29:1451-61.
- MOLZ, F.J. e I. REMSON, 1970. Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. *Water Resour. Res.* Washington D.C., 6:1346-56.

MOLZ, F.J. e I. REMSON, 1971. Application of an extraction term model to the study of moisture flow to plant roots. *Agron. J.* Madison, 63:72-7.

MOLZ, F.J., 1981. Models of water transport in the soil-plant system: A review. *Water Resour. Res.* Washington D.C., 17:1245-60.

MONTEITH, J.L., 1975. *Vegetation and the Atmosphere*. New York, Academic Press, v.1, 278p.

NEUMAN, S.P.; R.A. FEDDES e E. BRESLER, 1975. Finite element analysis of two dimensional flow in soils considering water uptake by roots: I. Theory. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* Madison, 39:224-30.

NEWMAN, E.I., 1969a. Resistance to water flow in soil and plant. I. Soil resistance in relation to amounts of roots: Theoretical estimates. *J. Appl. Ecol.* Oxford, 6:1-12.

NEWMAN, E.I., 1969b. Resistance to water flow in soil and plant. II. A review of experimental evidence on the rhizosphere resistance. *J. Appl. Ecol.* Oxford, 6:261-72.

NEWMAN, E.I., 1973. Permeability to water of the roots of five herbaceous species. *New Phytol.* Cambridge, 72:547-55.

NIMAH, M.N. e R.J. HANKS, 1973a. Model for estimating soil water, plant and atmospheric interrelations. I. Description and sensitivity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* Madison, 37:522-7.

- NIMAH, M.N. e R.J. HANKS, 1973b. Model for estimating. Soil water, plant and atmospheric interrelations. 2- Field test of model. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* Madison, 37:528-32.
- PHILIP, J.R., 1957. The physical principles of soil water movement during an irrigation cycle. *Trans. 3rd Congr. Int. Comm. Irrig. Drain.* San Francisco, 8:125-54.
- RAATS, P.A.C., 1976. Analytical solutions of a simplified flow equation. *Trans. Amer. Soc. Agric. Eng.* Saint Joseph, 19:683-89.
- REICOSKY, D.C. e J.T. RITCHIE, 1976. Relative importance of soil resistance and plant resistance in root water absorption. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* Madison, 40:293-7.
- RIJTEMA, P.E., 1965. An analysis of actual evapotranspiration. Wageningen, Inst. Land and Water Mgmt. Res. 197p. (Agric. Res. Rep. 659).
- ROSE, C.W.; W.R. STERN e J.E. DRUMMOND, 1965. Determination of hydraulic conductivity as a function of depth and water content for soil *in situ*. *Aust. J. Soil Res.* Melbourne, 3:1-9.
- ROSE, C.W. e W.R. STERN, 1967. Determination of withdrawal of water from soil by crop roots as a function of depth and time. *Aust. J. Soil Res.* Melbourne, 5:11-9.

- ROWSE, H.R.; D.A. STONE e A. GERWITZ, 1978. Simulation of the water distribution in soil. II. The model for cropped soil and its comparison with experiment. *Plant Soil*. The Hague, 49:534-50.
- SAMUI, R.P. e S. KAR, 1981. Soil and plant resistance effects on transpiration and leaf water responses by groundnut to soil water potential. *Aust. J. Soil Res.* Melbourne, 19:51-60.
- SEATON, K.A.; J.J. LANDSBERG e R.H. SEDGLEY, 1977. Transpiration and leaf potentials of wheat in relation to changing soil water potential. *Aust. J. Agric. Res.* Melbourne, 28:355-67.
- SLABBERS, P.J., 1980. Practical prediction of actual evapotranspiration. *Irrigat. Sci.* Berlin, 1:186-96.
- SLACK, O.C.; C.T. HAAN e L.G. WELLS, 1977. Modeling soil water movement into plant roots. *Trans. Amer. Soc. Agric. Eng.* Saint Joseph, 20:919-27.
- TAYLOR, H.M. e B. KLEPPER, 1975. Water uptake by cotton root systems: An examination of assumptions in the single root model. *Soil Sci.* Baltimore, 120:57-67.
- VAN BAVEL, C.H.M.; K.J. BRUST e G.B. STIRK, 1968. Hydraulic properties of a clay loam soil and the field measurement of water uptake by roots. I. Interpretation of water content and pressure profiles. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* Madison, 32:167-74.

- VAN DEN HONERT, T.H., 1948. Water transport in plants as a catenary process. *Disc. Faraday Soc.* London, 3:146-53.
- VISSER, W.C., 1964. Moisture requirements of crops and rate of moisture depletion of the soil. Wageningen, Inst. Land and Water Mgmt. Res. p. 1-21. {Tech. Bull. 32}.
- WHISLER, F.D.; A. KLUTE e R.J. MILLINGTON, 1968. Analysis of steady state evapotranspiration from a soil column. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* Madison, 32:167-74.
- YANG, S.J. e E. DE JONG, 1971. Effect of soil water potential and bulk density on water uptake patterns and resistance to flow of water in wheat plants. *Can. J. Soil Sci.* Ottawa, 51:211-20.
- ZUR, B. e J.W. JONES, 1981. A model for the water relations, photosynthesis and expansive growth of crops. *Water Resour. Res.* Washington D.C., 17:311-20.
- ZUR, B.; J.W. JONES; K.J. BOOTE e L.C. HAMMOND, 1982. Total resistance to water flow in field soybeans. II. Limiting soil moisture. *Agron. J.* Madison, 74:99-105.

FUNÇÕES DE EXTRAÇÃO DE ÁGUA DO SOLO PELAS RAÍZES

1. GARDNER (1964)*:

$$q_r = B (\delta - \tau - z) K L(z)$$

onde B é uma constante empírica representando a atividade das raízes, δ o potencial da água nas raízes, τ o potencial matricial da água no solo, z a profundidade, K a condutividade hidráulica insaturada do solo e $L(z)$ o comprimento de raízes por unidade de volume de solo.

2. WHISLER *et alii* (1968)*:

$$q_r = A(z) K (h_p - h_s)$$

onde $A(z)$ é uma função de densidade de raízes, K a condutividade hidráulica do solo, h_p o potencial da água nas raízes e h_s o potencial total da água no solo.

3. NIMAH e HANKS (1973)*:

$$q_r = [H_r + (\text{PRES } z) - H(z,t) - s(z,t)] \text{RDF}(z) K / (\Delta x \Delta z)$$

onde H_r é a pressão interna das raízes na superfície do solo onde a profundidade z é igual a zero, PRES o coeficiente de perda de carga para o fluxo longitudinal no xilema das raízes, $H(z,t)$ o potencial matricial da água no solo, $s(z,t)$ o potencial osmótico da água no solo e $\text{RDF}(z)$ a proporção das raízes ativas totais na camada Δz .

4. FEDDES *et alii* (1974)*:

$$q_r = -K [h_r(z) - h_s(z)] / b(z)$$

onde K é a condutividade hidráulica do solo, $h_r(z)$ o potencial da água na interface solo-raiz, $h_s(z)$ o potencial total da água no solo e $b(z)$ uma função empírica representando a geometria do fluxo

($b = \ln r_2/r_1/2\pi L(z)$), onde r_2 é o raio do cilindro equivalente suposto igual à metade da distância média entre as raízes, $r_2 = 1/[\pi L(z)]^{1/2}$, r_1 o raio do cilindro interno, suposto igual ao raio das raízes) e $L(z)$ o comprimento de raízes por unidade de volume de solo.

5. HILLEL *et alii* (1976)*:

$$q_r = (\phi_s - \phi_p)/(R_s + R_r)$$

onde ϕ_s é o potencial total da água no solo, ϕ_p o potencial da água na planta na base do caule, R_s a resistência ao fluxo de água no solo, igual a $1/BKL(z)$ (B é uma constante empírica, K a condutividade hidráulica do solo e $L(z)$ o comprimento de raízes por unidade de volume de solo), R_r a resistência das raízes tomada como a soma das resistências à absorção e à condução de água, que depende da profundidade.

6. ROWSE *et alii* (1978)*:

$$q_r = \Delta Z L(z) (h_s - h_p)/(R_s + R_p)$$

onde Δz é a espessura da camada de solo, $L(z)$ o comprimento de raízes por unidade de volume de solo, h_s o potencial total da água no solo, h_p o potencial da água na planta suposto constante através do xilema e das raízes, R_s a resistência do solo à extração de água por unidade de comprimento de raiz, igual a $\ln(r_s^2/r_r^2)/4\pi K$ (r_s é o raio do cilindro equivalente suposto igual à metade da distância média entre as raízes ($r_s = 1/[\pi L(z)]^{1/2}$) e r_r o raio do cilindro interno, suposto igual ao raio das raízes) e R_p a resistência da planta ao fluxo de água.

7. HERKELRATH *et alii* (1977):

$$q_r = \frac{\theta}{\theta_{sat}} \rho \ell (\psi_s - \psi_r)$$

onde θ e θ_{sat} são, respectivamente, a umidade atual e de saturação, ρ a permeabilidade das raízes por unidade de comprimento, ℓ o comprimento de raízes por unidade de volume de solo, ψ_s o potencial da água no solo e ψ_r o potencial da água no interior das raízes.

8. MOLZ (1981):

$$q_r(z,t) = \frac{T(t) \theta(z,t) L(z,t) [\psi(z,t) - \phi_x(t)]}{\int_0^{v(t)} \theta(z,t) L(z,t) [\psi(z,t) - \phi_x(t)] dz}$$

onde z é a profundidade, t o tempo, ψ o potencial da água no solo, $T(t)$ a taxa de transpiração por unidade de área, $\theta(z,t)$ a umidade volumétrica do solo, $L(z,t)$ o comprimento de raízes por unidade de volume de solo, $v(t)$ profundidade do sistema radicular e $\phi_x(t)$ o potencial da água no xilema das raízes.

* Os diferentes símbolos usados nas funções 1, 2, 3, 4, 5 e 6 podem ser identificados através da resistência do solo r_s :

$$r_s^{-1} = K B L(z) = K A(z) = K RDF(z) / (\Delta x \Delta z) = K/b(z)$$

função (1, 5) (2) (3) (4, 7)

EVAPOTRANSPIRACAO POTENCIAL (PENMAN-MONTEITH)

DIA	TEMP	UR	DEFICE (MM)	V. VENTO (KM/DIA)	RAD SOLAR (CAL/CM2.DIA)	ETP (CM/DIA)
1	10.8	0.7204	6.00	144.2	170.	0.3475
2	19.3	0.6242	8.31	146.9	170.	0.3024
3	18.4	0.5671	9.07	112.3	182.	0.3672
4	17.7	0.5567	0.91	25.9	179.	0.2474
5	17.5	0.5883	7.98	164.2	182.	0.4169
6	18.5	0.5800	8.86	86.4	178.	0.3224
7	18.7	0.5867	8.02	103.7	177.	0.3445
8	17.9	0.5713	8.72	129.6	180.	0.3641
9	15.0	0.5252	8.05	190.1	177.	0.4631
10	19.3	0.5633	9.65	112.3	154.	0.3431
11	20.4	0.6767	7.62	155.5	92.	0.2020
12	18.9	0.6446	7.24	207.4	139.	0.3921
13	19.2	0.6875	6.87	25.9	103.	0.1455
14	19.9	0.6600	7.78	146.9	128.	0.3200
15	18.7	0.5592	9.41	0.1	132.	0.1503
16	18.3	0.5042	10.33	198.7	151.	0.4567
17	17.9	0.6125	7.89	146.9	140.	0.3437
18	18.2	0.6555	7.14	69.1	152.	0.2560
19	15.9	0.6417	6.47	121.0	150.	0.2973
20	19.1	0.6088	8.55	103.7	150.	0.3066
21	19.1	0.6213	8.27	190.1	164.	0.4306
22	17.9	0.5896	8.35	86.4	170.	0.3069
23	17.8	0.6150	7.79	0.1	132.	0.1478
24	18.4	0.5267	8.45	155.5	145.	0.3722
25	18.5	0.5233	10.05	34.6	160.	0.2362
26	20.6	0.4092	14.09	440.6	122.	1.0495
27	15.7	0.8842	2.07	138.2	20.	0.0713
28	16.5	0.7613	4.47	233.3	94.	0.2794
29	18.6	0.6771	6.85	86.4	163.	0.2701
30	17.4	0.7992	4.01	216.0	98.	0.2506
31	16.6	0.7259	5.16	205.1	100.	0.3580
32	16.7	0.6538	6.56	544.3	195.	0.8148
33	17.6	0.5971	8.05	224.6	180.	0.5044
34	17.1	0.5892	7.97	276.5	189.	0.5745
35	16.6	0.4959	9.49	233.3	191.	0.5831
36	15.0	0.4517	9.37	267.8	195.	0.6554
37	16.9	0.4657	10.24	138.2	156.	0.4083
38	15.0	0.8709	2.21	112.3	14.	0.0592
39	16.0	0.6413	6.52	146.9	123.	0.2901
40	15.0	0.6867	5.36	69.1	151.	0.1942
41	19.6	0.5850	9.34	146.9	158.	0.3901
42	19.8	0.5217	10.89	86.4	164.	0.3316
43	19.4	0.5046	11.02	86.4	218.	0.3963
44	19.4	0.4405	12.44	86.4	195.	0.3084
45	19.1	0.3725	13.71	77.8	176.	0.3662
46	18.9	0.3988	12.98	40.5	196.	0.3450
47	18.6	0.3955	12.82	121.0	195.	0.4653
48	18.5	0.3859	12.95	259.2	193.	0.7482
49	17.7	0.4117	11.83	190.1	195.	0.5030
50	19.2	0.3967	13.24	101.4	191.	0.5009
51	18.6	0.6663	7.08	276.5	159.	0.4881
52	17.2	0.6521	6.79	328.3	175.	0.5673
53	19.1	0.5792	9.19	276.5	172.	0.5893
54	18.2	0.5375	9.58	164.2	194.	0.4696
55	18.6	0.5375	9.81	0.1	191.	0.2170
56	19.3	0.4033	11.42	121.0	183.	0.4221
57	19.9	0.4309	12.03	129.6	176.	0.4574
58	21.7	0.3008	15.74	233.3	190.	0.7415
59	21.6	0.5054	10.48	51.8	117.	0.2166
60	21.1	0.5858	10.17	172.8	121.	0.3951
61	23.1	0.3700	17.35	101.4	179.	0.8367
62	23.5	0.5558	12.52	198.7	169.	0.5330
63	22.4	0.5408	12.15	267.8	137.	0.6095
64	22.9	0.5196	13.08	121.0	175.	0.4250
65	22.4	0.4059	13.60	60.5	161.	0.3070
66	21.0	0.2943	17.10	276.5	213.	0.9349
67	20.7	0.3529	15.52	95.0	214.	0.4664
68	22.2	0.4254	12.03	267.8	197.	0.7907
69	23.9	0.4242	15.68	146.9	190.	0.5397
70	23.8	0.3000	17.52	328.3	179.	0.9645
71	23.4	0.4708	14.83	146.9	183.	0.5106
72	22.6	0.5005	13.37	0.1	204.	0.2476
73	21.6	0.4600	13.65	190.1	203.	0.6071
74	22.1	0.2800	18.73	345.6	233.	1.1732
75	21.6	0.2963	17.78	155.5	203.	0.6372
76	21.5	0.3575	16.14	155.5	198.	0.5903
77	22.3	0.3196	17.90	130.2	219.	0.6031
78	23.9	0.3371	19.11	164.2	211.	0.6649
79	23.8	0.3179	19.55	146.9	212.	0.6330
80	23.0	0.3042	16.86	69.1	174.	0.3677
81	23.4	0.3225	18.90	69.1	205.	0.4238
82	23.6	0.3658	17.97	198.7	197.	0.7077
83	23.7	0.3705	17.94	60.5	177.	0.3591
84	25.0	0.3405	20.22	224.6	171.	0.7755
85	22.5	0.7259	7.29	224.6	27.	0.2553

PREVISÃO DAS TAXAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL

O efeito da diminuição da umidade do solo nas taxas de evapotranspiração pode ser verificado através da solução simultânea das seguintes 4 equações representando as interações mútuas das 4 subsistemas do contínuo solo-planta-atmosfera:

$$Q_r = - (\psi_\ell - \psi_s) / (R_{pl} + R_s) \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_r = ET \dots \dots \dots (2)$$

$$ET = f(\text{fatores climáticos} \cdot 1/r_\ell) \dots \dots \dots (3)$$

$$1/r_\ell = f(\psi_\ell) \dots \dots \dots (4)$$

onde ψ_ℓ e ψ_s são os potenciais totais da água na folha e no solo, R_{pl} e R_s as resistências globais da planta e do solo, Q_r e ET são, respectivamente, a taxa global e extração de água pelas raízes e a taxa de evapotranspiração e r_ℓ a resistência a difusão do vapor d'água na folha.

Na maioria das plantas, r_ℓ é constante numa certa faixa e aumenta abruptamente noutra quando ψ_ℓ cai abaixo de um valor aparentemente crítico (ψ_ℓ^{cr}). Também, sabe-se que a evapotranspiração real (ETR) é igual a potencial (ETP) até que uma certa fração da umidade disponível no solo seja exaurida. Após, há uma redução na taxa de evapotranspiração, dependente da umidade do solo remanescente e da taxa de evapotranspiração potencial. Essas relações são discretas pelas seguintes equações:

$$ET = ETP \text{ para } ASM_t \geq ASM_o \dots \dots \dots (5)$$

$$ET = \frac{ASM_t}{f ASM_0} ETP \quad \text{para } ASM_t < f ASM_0 \quad (6)$$

onde ASM_0 e ASM_t representam a umidade disponível máxima atual (no tempo t) no solo e f a fração de água disponível na qual se inicia a redução. A máxima umidade disponível no solo refere-se a quantidade de água retida entre a capacidade de campo (333 cm) e ponto de murchamento permanente (15.000 cm), ambas com referência à profundidade do sistema radicular. A umidade disponível no solo quando o potencial da água na folha atinge seu valor crítico é igual a $f \theta_{m\acute{a}x}$.

Integrando e substituindo as equações (5) e (6), tem-se como solução para evapotranspiração média diária sobre um intervalo de tempo (t em dias):

$$\bar{E} = ASM_0/t \{1 - f, \exp - [(ETP t/f ASM_0) - (1 - f)/f]\} \quad (7)$$

para $t \geq (1 - f) ASM_0/ETP$

A evapotranspiração real é então descrita como função das características física do solo e profundidade do sistema radicular (ASM_0), evapotranspiração potencial (ETP) e intervalo de tempo (t). Conhecidos estes fatores, deve-se determinar a variável f para a solução da equação (7).

APLICAÇÃO AO PRESENTE ESTUDO

A fração de água disponível (f) na qual se inicia a redução das taxas de evapotranspiração potencial pode ser determinada a par-

tir do potencial da água no solo e das resistências globais das plantas e do solo:

$$\psi_s = - 2,71 \cdot 10^7 \exp - 34,36 \theta \dots \dots \dots (8)$$

$$R_r \simeq R_{p\ell} = - 8716,6 + 1970,4 \ln (- \psi_s) \dots \dots \dots (9)$$

$$R_s = 1,56 \cdot 10^{-5} (- \psi_s)^{2,36} \dots \dots \dots (10)$$

Substituindo-se a equação (8) em (9) e $\theta = \frac{f}{f_{\max}} \theta_{\max}$, ($\theta_{\max} = 0,330$), tem-se:

$$R_{p\ell} = 25005 - 22275 f \dots \dots \dots (11)$$

Combinando-se (1), (2), (10) e (11), obtem-se a expressão final para f :

$$f = 1,12 + 7,00 \cdot 10^{-10} (- \psi_s)^{2,36} + 4,49 \cdot 10^{-5} (\psi_\ell - \psi_s)/ETP \dots \dots (12)$$

Supondo-se $\psi_\ell^{cr} = 8000$ cm, pode-se construir a seguinte Tabela de f em função das taxas de evapotranspiração potencial e do potencial da água no solo.

ψ_s (cm)	ETP (cm . dia ⁻¹)								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
500	-	0	0,28	0,45	0,56	0,64	0,70	0,75	0,78
1000	-	0,08	0,34	0,50	0,60	0,68	0,74	0,78	0,81
1500	-	0,17	0,41	0,56	0,66	0,72	0,78	0,82	0,85
2000	-	0,27	0,49	0,62	0,71	0,78	0,83	0,86	0,89
3000	0,11	0,48	0,67	0,78	0,86	0,91	0,95	0,98	-

As taxas médias de evapotranspiração real são então calculadas usando a equação (7), ($ASM_o = 20,2$ cm).