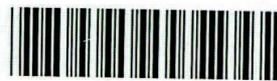


CAMILO DE LELIS TEIXEIRA DE ANDRADE

Balanco de agua de um

1987

TS - T.03/87



3129 - 1

BALANÇO DE ÁGUA EM UM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO ÁLICO,
CULTIVADO COM MILHO (*Zea mays* L.), SOB IRRIGAÇÃO
POR ASPERSÃO

T
03/87

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Engenharia
Agrícola, para Obtenção do Título
de "Magister Scientiae".

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
AGOSTO - 1987

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

A553b
1987
Andrade, Camilo de Lelis Teixeira de.
Balanço de água em um Latossolo Vermelho-Escuro
álico, cultivado com milho (Zea mays L.), sob irri-
gação por aspersão. Viçosa, UFV, Impr. Univ., 1987.
84p. ilustr.

Tese (M.S.) - UFV

1. Solos - Balanço hídrico. 2. Relação solo -
água-plantas. 3. Milho - Irrigação por aspersão. 4.
Milho - Coeficiente de cultura. 5. Milho - Evapo-
transpiração. 6. Irrigação por aspersão. 7. Drena-
gem profunda. 8. Latossolo Vermelho-Escuro álico.
9. Evapotranspiração. 10. Solos - Umidade. I. Uni-
versidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 18.ed.: 631.4

CDD 19.ed.: 631.4

EMPRESA/DOT	
Valor Aquisição Cr\$
Data Aquisição
N.º W. Fiscal Fatura
Fornecedor
N.º Ordem Compra
Origem
N.º do Tombo	7.0986

CAMILO DE LELIS TEIXEIRA DE ANDRADE

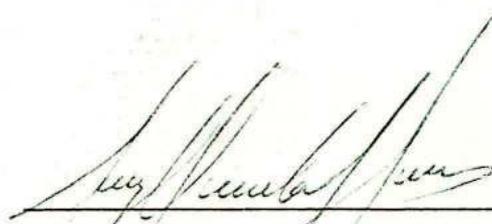
BALANÇO DE ÁGUA EM UM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO ÁLICO,
CULTIVADO COM MILHO (*Zea mays* L.), SOB IRRIGAÇÃO
POR ASPERSÃO

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Engenharia
Agrícola, para Obtenção do Título
de "Magister Scientiae".

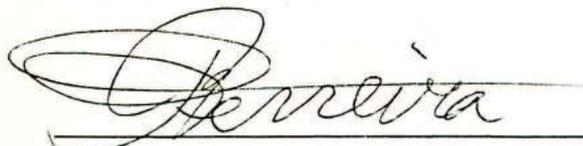
APROVADA: 20 de maio de 1987



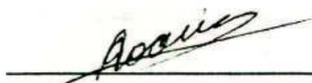
Dr. Tarciso José Caixeta



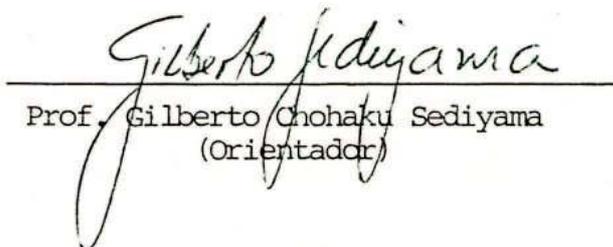
Dr. Luiz Marcelo Aguiar Sans



Prof. Paulo Afonso Ferreira
(Conselheiro)



Prof. Antonio Alves Soares



Prof. Gilberto Chohaku Sedyama
(Orientador)

Ao meu pai, Geraldo (*in memoriam*).

À minha mãe, D. Célia.

A todos os meus irmãos.

À Isabel.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização desse curso.

Ao Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo-EMBRAPA, pela possibilidade de realização, em suas dependências, de todas as etapas da tese.

Ao Professor Gilberto Chohaku Sedyama, pela brilhante orientação, pela paciência e pela dedicação.

Aos Conselheiros Dr. Lairson Couto e Dr. Luiz Marcelo Aguiar Sans, pelo constante empenho durante todas as etapas da realização desse trabalho.

A todos os funcionários do setor de irrigação, pelo apoio na condução dos trabalhos de campo e, especialmente, à Vilmar Martins Ferreira, pela grande dedicação e responsabilidade.

Aos funcionários dos setores de laboratórios, processamento de dados, reprografia e serviços auxiliares, pela execução das análises laboratoriais, processamento dos resultados, confecção de desenhos, serviços datilográficos e multiplicação da tese.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA, pela ajuda financeira.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho.

BIOGRAFIA

CAMILO DE LELIS TEIXEIRA DE ANDRADE, filho de Geraldo Teixeira de Andrade e de Célia Teixeira de Andrade, nasceu no dia 25 de março de 1960, em Carrancas, MG.

Em 1978, concluiu o segundo grau na Escola Estadual de 1ª e 2ª Graus Maria José, em São Paulo, SP.

No período de janeiro de 1976 a fevereiro de 1979, trabalhou como Auxiliar de Arquivista e Auxiliar de Contas a Pagar em São Paulo, SP, quando iniciou o curso de Engenharia Agrícola na Escola Superior de Agricultura de Lavras-ESAL, Lavras, MG, concluindo-o em dezembro de 1983.

Em 1984, estagiou com bolsa do Programa de Integração Ensino Pesquisa - PIEP, no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo - CNPMS/EMBRAPA, Sete Lagoas, MG, na área de Irrigação e Drenagem.

Em 1985, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
EXTRATO	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Características Gerais da Área	23
3.2. Instalação da Parcela Experimental e Manejo da Irrigação	24
3.3. Monitoramento da Umidade e do Potencial de Água no Solo	25
3.4. Características Morfológicas, Físico-Hídricas e Químicas do Solo	25
3.4.1. Descrição Morfológica do Solo	25
3.4.2. Análises Granulométricas e Química ...	25
3.4.3. Densidade do Solo	26
3.4.4. Porosidade Total	26
3.4.5. Retenção de Água	26
3.4.6. Limites Superior e Inferior de Água Disponível	26
3.5. Dados Climatológicos e Estimativas do Fluxo de Evapotranspiração de Referência	27
3.6. Matéria Seca e Área Foliar	27
3.7. Balanço de Água no Solo	28

	Página
3.7.1. Chuva e Irrigação	29
3.7.2. Variação do Armazenamento de Água no Solo	29
3.7.3. Drenagem Profunda e Ascensão Capilar .	29
3.7.4. Evapotranspiração da Cultura	31
3.8. Influência do Déficit Hídrico na Evapotranspi ração da Cultura	31
3.9. Coeficiente de Cultura	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1. Características Físico-Hídricas do Solo	33
4.1.1. Propriedades Físicas	33
4.1.2. Curva Característica de Retenção de Um idade	35
4.1.3. Limite Superior e Inferior de Água Dis ponível	37
4.1.4. Água Disponível	40
4.2. Balanço de Água no Solo	41
4.3. Evapotranspiração da Cultura em Função do Dé ficit de Água no Solo	48
4.4. Coeficiente de Cultura	54
5. RESUMO E CONCLUSÕES	57
BIBLIOGRAFIA	60
APÊNDICES	69
APÊNDICE A - Teor de Umidade em Equilíbrio com Po tenciais Matriciais de 0 a -1,500 MPa, Volume de Macro e Microporos e Armaze namento de Água no Volume de Controle, para Cinco Horizontes do Latossolo Ver melho Escuro Álico, Fase Cerrado. Sete Lagoas, MG, 1986	70
APÊNDICE B - Teor de Umidade do Solo, Armazenamento de Água no Volume de Controle, Poten cial Total de Água no Solo e Posição do Plano de Fluxo Zero, no Período de 42 a 115 DAP. Sete Lagoas, MG, 1986 .	72
APÊNDICE C - Balanço Hídrico Geral, Fluxo Médio de Evapotranspiração de Referência e Coe ficiente de Cultura, para os Quatro Pe ríodos Estudados. Sete Lagoas, MG, 1986	79
APÊNDICE D - Fluxo Diário de Evapotranspiração de Referência, Estimado pelo Método de Pen man. Sete Lagoas, MG, 1986	81
APÊNDICE E - Características Químicas do Latossolo Vermelho-Escuro Álico, Fase Cerrado. Sete Lagoas, MG, 1986	83

LISTA DE QUADROS

	Página
1 Características Físico-Hídricas e Químicas do Latossolo Vermelho-Escuro Álico, Fase Cerrado. Sete Lagoas, MG, 1986	34
1A Teor de Umidade em Equilíbrio com Potenciais Matriciais de 0 a -1,500 MPa, Volume de Macro e Microporos e Armazenamento de Água no Volume de Controle, para Cinco Horizontes do Latossolo Vermelho-Escuro Álico, Fase Cerrado. Sete Lagoas, MG, 1986	71
1B Teor de Umidade do Solo das Parcelas 01 e 02 e Armazenamento de Água no Volume de Controle, no Período de 42 a 115 DAP. Sete Lagoas, MG, 1986.	73
2B Potencial Total de Água no Solo das Parcelas 01 e 02 e Posição do Plano de Fluxo Zero, no Período de 42 a 115 DAP. Sete Lagoas, MG, 1986.	76
1C Balanço Hídrico Geral, Fluxo Médio de Evapotranspiração de Referência e Coeficiente de Cultura, para os Quatro Períodos Estudados. Sete Lagoas, MG, 1986	80

1D	Fluxo Diário de Evapotranspiração de Referência, Estimado pelo Método de Penman. Sete Lagoas, 1986	82
1E	Características Químicas do Latossolo Vermelho - Escuro Álico, Fase Cerrado. Sete Lagoas, MG, 1986	84

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Esquema de Determinação da Variação do Armazenamento, da Drenagem Profunda e da Ascensão Capilar, no Volume de Controle Considerado	30
2 Curva Característica de Retenção de Umidade dos Horizontes Ap, A3, B21, B22 e Média Ponderada de Todos os Horizontes. Sete Lagoas, MG, 1986 ..	36
3 Depleção de Água no Solo, Medida e Estimada em uma Bacia Coberta com Lona Plástica. Sete Lagoas, MG, 1986	38
4 Perfis de Umidade do Solo no Limite Superior de Água Disponível, Determinado no Campo e Estimado pela Equação Ajustada e Perfis de Umidade Submetida à 0,010 MPa e à -1,500 MPa. Sete Lagoas, MG, 1986	39
5 Chuva, Irrigação das Parcelas 01 e 02, Evapotranspiração de Referência, Evapotranspiração da Cultura das Parcelas 01 e 02 e Drenagem Profunda ou Ascensão Capilar das Parcelas 01 e 02. Sete Lagoas, MG, 1986	43

6	Peso de Matéria Seca da Parte Aérea, das Folhas e IAF até as 76 DAP, e Peso de Matéria Seca da Parte Aérea e das Folhas, das Parcelas 01 e 02. Sete Lagoas, MG, 1986	47
7	Valores Experimentais e Estimados da Relação qe_2/qe_1 em Função do Número de Dias Após o Plantio, do Armazenamento e da Água Disponível nas Parcelas 01 e 02. Sete Lagoas, MG, 1986.	49
8	Perfis de Umidade e de Potencial Total de Água no Solo, do Início e Final da Fase de Decréscimo da Relação qe_2/qe_1 . Sete Lagoas, MG, 1986.	51
9	Evapotranspiração Real em Função da Evapotranspiração de Referência, do Coeficiente de Cultura e da Disponibilidade de Água. Sete Lagoas, MG, 1986	54
10	Coeficiente de Cultura em Função do Número de Dias Após o Plantio. Sete Lagoas, MG, 1986 ..	55

LISTA DE SÍMBOLOS

Descrição

A100	Armazenamento de água no volume de controle (mm).
AD100	Água disponível no volume de controle (mm).
C	Lâmina de chuva (mm).
CC	Capacidade de campo (%).
DAP	Dias após o plantio (dia).
Dg	Densidade global (g cm^{-3}).
Dp	Densidade de partículas (g cm^{-3}).
D(θ)	Função que relaciona a difusividade da água no solo com o teor de umidade.
ETc	Evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}).
ETmax	Evapotranspiração máxima da cultura (mm dia^{-1}).
ETo	Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).
ETr	Evapotranspiração real (mm dia^{-1}).
I	Lâmina de irrigação (mm).
IAF	Índice de área foliar.
Kc	Coefficiente de cultura.
K(θ)	Função que relaciona a condutividade hidráulica do solo com o teor de umidade.
PFZ	Plano de fluxo zero.

PMP	Ponto de murcha permanente (%).
PT	Porosidade total (%).
Qe	Lâmina de evapotranspiração (mm).
Qz	Lâmina de drenagem profunda (-) ou de ascensão capilar (+). (mm).
T	Capacidade de troca de cátions (Eq. $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$).
c	Fluxo de água devido a chuva (mm dia^{-1}).
i	Fluxo de água devido a irrigação (mm dia^{-1}).
q	Fluxo de água (mm dia^{-1}).
qe	Fluxo de evapotranspiração (mm dia^{-1}).
qe ₁	Fluxo de evapotranspiração da parcela 01 (mm dia^{-1}).
qe ₂	Fluxo de evapotranspiração da parcela 02 (mm dia^{-1}).
qz	Fluxo de drenagem profunda (-) ou de ascensão capilar (+) (mm dia^{-1}).
t	Tempo (dia).
z	Coordenada vertical orientada positivamente para baixo.
θ	Teor de umidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).
θ_c	Teor de umidade crítico ou "ponto crítico" ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).
$\theta(t)$	Função que relaciona o teor de umidade do solo com o tempo.
Ψ	Potencial total de água no solo (MPa).
Ψ_m	Potencial matricial de água no solo (MPa).
$\Psi_m(\theta)$	Função que relaciona o potencial matricial de água no solo com o teor de umidade.
ΔAz	Variação do armazenamento de água na camada de solo de profundidade z (cm).

EXTRATO

ANDRADE, Camilo de Lelis Teixeira de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 1987. *Balanço de Água em um Latossolo Vermelho-Escuro Alíco, Cultivado com Milho (*Zea mays* L.), sob Irrigação por Aspersão*. Professor Orientador: Gilberto Chohaku Sedyama. Conselheiros: Dr. Lairson Couto (EMBRAPA), Paulo Afonso Ferreira (U.F.V.).

Foi conduzida uma pesquisa em um Latossolo Vermelho-Escuro alíco, fase relevo suave ondulado cerrado, localizado no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo-EMBRAPA, Sete Lagoas, MG, com a finalidade de estabelecer o balanço de água no solo cultivado com milho, sob condições de irrigação por aspersão.

Por intermédio do balanço de água no solo, determinou-se o fluxo de evapotranspiração da cultura sem limitação de água (ET_{max}), que, associado com o fluxo de evapotranspiração de referência (ET_o), possibilitou a obtenção do coeficiente de cultura (K_c), para os principais estádios do ciclo da planta.

Analisou-se o efeito do decréscimo da água disponível no solo (AD_{100}), na relação entre a evapotranspiração real e máxima da cultura (ET_r/ET_{max}), estabelecendo-se o ponto crítico de umidade abaixo do qual a relação ET_r/ET_{max} decresce do valor unitário. Estabeleceu-se uma equação para determinação da ET_r em função de AD_{100} , ET_o e K_c .

A quantificação dos componentes do balanço permitiu uma série de observações com relação à dinâmica da água no sistema solo-água-planta-atmosfera.

As perdas por drenagem profunda atingiram 67% do total das perdas (drenagem e evapotranspiração), decrescendo, entretanto, com o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea da planta. Embora o sistema radicular do milho, nesse solo, esteja contido em poucos centímetros abaixo da superfície e a condutividade hidráulica não-saturada caia drasticamente com a redução do teor de umidade, o movimento ascendente de água contribuiu significativamente para o suprimento da planta, chegando a $2,4 \text{ mm dia}^{-1}$, após um longo período de déficit, subsequente a um período chuvoso. O fluxo médio de evapotranspiração da cultura atingiu um valor máximo de $5,96 \text{ mm dia}^{-1}$, que, em relação ao fluxo médio de evapotranspiração de referência, correspondeu a um coeficiente de cultura máximo de 1,23.

A relação E_{Tr}/E_{Tmax} permaneceu igual a unidade até que o teor de umidade médio do volume de controle fosse reduzido a $0,315 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, o que correspondeu a 44% da água disponível. A partir desse ponto, a relação E_{Tr}/E_{Tmax} decresceu de forma linear, segundo a equação $E_{Tr}/E_{Tmax} = 1 - 1/44 AD100$, porém, como $E_{Tmax} = KcE_{To}$, a equação ficou modificada para $E_{Tr} = (1 - 1/44 AD100)KcE_{To}$.

1. INTRODUÇÃO

A crise econômica dos anos 80 tem requerido esforços decisivos do setor agropecuário, no sentido de gerar incrementos de produção para atender ao problema atual do crescimento da demanda, assim como oferecer matérias-primas com qualidade e quantidade suficientes para o bom funcionamento dos setores industrial e de exportação.

O aumento da produção pode ser alcançado, basicamente, através da expansão da fronteira agrícola e/ou do aumento da produtividade (23). A expansão pura e simples da fronteira agrícola, com incorporação de novas áreas marginais para a produção, constitui uma alternativa que, embora muitas vezes viável, pode ser freqüentemente limitada pela necessidade de altas inversões de capital em infra-estrutura básica. Hoje, em função desta realidade, tem-se trabalhado o aumento da produtividade, não somente por meio da pesquisa e da adoção de tecnologia, como também pela alocação de recursos pelo governo, através de programas nacionais e regionais. Exemplos desses programas são o PROFIR e, recentemente, o PRONI, que visam, através da irrigação, tirar da ociosidade as terras no período seco do ano, prevenir males decorrentes de veranicos e melhorar a produtividade e o uso racional dos recursos naturais e técnicos.

Os solos sob vegetação de cerrado, com predomínio dos

Latossolos, com 56%, ocupam uma área de aproximadamente 180 milhões de hectares e se estendem, principalmente, pela região Centro-Oeste, atingindo parte da região Norte, Nordeste e Sudeste, sendo a principal opção do Brasil para o incremento da área agrícola (23). Essa potencialidade da região dos cerrados para o incremento da produção agrícola deve-se a uma série de fatores, entre outros, a presença de infra-estrutura viária e de serviços; proximidade aos grandes centros consumidores; características físicas do solo e climáticas, favorecendo o crescimento e o desenvolvimento das plantas o ano todo; relevo suave a ondulado, facilitando a motomecanização; abundância de jazidas de calcário e fosfato, para correção da fertilidade do solo e disponibilidade de tecnologia nos centros de pesquisa, localizados na região (41).

Embora com esse elevado potencial agrícola, estes solos vêm permitindo índices de produtividade média; anível de produtor, ainda muito baixos (23). Entre os fatores responsáveis por essa baixa produtividade, estão a má distribuição pluviométrica, a baixa capacidade de retenção de água e a elevada toxidez de alumínio dos solos. A baixa capacidade de retenção de água, associada à alta saturação de alumínio nos horizontes subsuperficiais, limita o desenvolvimento do sistema radicular das plantas mais sensíveis e, conseqüentemente, a disponibilidade de água, tornando-as mais susceptíveis ao déficit hídrico (41).

O regime pluviométrico da região do cerrado caracteriza-se por uma grande variação na distribuição das chuvas, apresentando, todavia, uma estação seca severa nos meses de abril a setembro, quando só é possível a agricultura irrigada (41). Mesmo no período chuvoso, que se estende de outubro a março, a distribuição irregular das precipitações determina o aparecimento de veranicos. Os veranicos são períodos sem chuva, normalmente coincidindo com períodos de alta demanda por evapotranspiração (22, 41).

Diante do discutido anteriormente, pode-se afirmar que a irrigação é uma tecnologia desejável e necessária para o desenvolvimento de uma agricultura racional nessa região.

A importância do milho no Brasil pode ser avaliada por meio de alguns fatos como: 1) é a cultura que ocupa maior área cultivada; 2) devido as suas características de produção, é a exploração responsável pelo maior emprego de mão-de-obra no setor rural; 3) é o principal fornecedor de insumos alimentícios para as atividades de criação animal, que atualmente experimentam grande desenvolvimento e 4) é uma cultura de expressão nacional, pois é plantada de Norte a Sul do País (22).

Como alimento, o milho constitui importante fonte de energia para as classes de menor poder aquisitivo, em virtude do seu baixo preço. Como alimento para animais, além do consumo direto de grãos, é amplamente empregado como componente energético em rações para suínos, para aves e para bovinos (22).

Por outro lado, o milho é cultivado em uma ampla faixa de meios ambiente (22), o que o torna uma alternativa muito importante como cultura de entressafra, notadamente nos sistemas de produção com irrigação.

A tecnologia de irrigação complementa os requisitos exigidos para maior produtividade e estabilidade na produção, que são: a eliminação dos riscos, a utilização mais intensiva dos fatores terra, mão-de-obra, máquinas e administração, além de permitir melhor aproveitamento dos insumos recomendados pela pesquisa (23, 41).

Embora já exista uma gama considerável de informações para muitas espécies cultivadas no cerrado, há necessidade do desenvolvimento de novas técnicas e o aprimoramento das existentes, principalmente em se tratando de agricultura irrigada.

A água é fator fundamental no desenvolvimento e crescimento de uma plantas, pois afeta, além de inúmeros processos fisiológicos (36), o desenvolvimento do sistema radicular, a absorção e a transferência de nutrientes pelas raízes. O conhecimento detalhado do sistema solo-água-planta-atmosfera, especificamente em relação à dinâmica da água no solo e à sua absorção pelas plantas, fornece elementos essenciais para o desenvolvimento ou aprimoramento de práticas de

manejo agrícola. A dinâmica da água no solo tem sido estudada por intermédio de balanços hídricos, baseados, principalmente, em informações climáticas, deixando para um segundo plano as informações edáficas (56).

Considerando a necessidade do desenvolvimento de tecnologia para a irrigação do milho, cultivado em solos sob cerrado, empreendeu-se este trabalho com os seguintes objetivos: a) estabelecer o balanço de água no solo sob cerrado cultivado com milho, sob condições de irrigação por aspersão, e determinar a taxa de evapotranspiração da cultura em base diária; b) estabelecer a curva que relaciona o fator de cultura (K_c) e os estádios da cultura do milho, sob condições de irrigação por aspersão e c) estabelecer a relação entre a evapotranspiração real e máxima da cultura *versus* o teor de água disponível no solo e determinar o ponto crítico de umidade abaixo do qual a referida relação torna-se menor que o valor unitário.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O balanço hídrico é a contabilidade da quantidade de água que entra em um elemento de volume de solo considerado e sai do mesmo, num intervalo de tempo, resultando na lâmina d'água que nele permanece disponível (3, 9, 15, 39, 52, 54, 62). A quantificação de cada um dos componentes do balanço hídrico, ao longo do ciclo de uma cultura, permite a avaliação do comportamento da água no solo, a sua extração pelas plantas, as perdas por evaporação ou drenagem profunda, além de fornecer subsídios à tomada de decisões de quando e quanto irrigar.

REICHARDT (54) expressa o balanço hídrico do solo por intermédio do somatório dos fluxos de água que entram em uma dada camada de solo, com profundidade z e sai dela, sendo, geralmente, esta profundidade igual à profundidade do sistema radicular. A equação que expressa esse balanço hídrico é do tipo:

$$\int_{t_j}^{t_{j+1}} (c + i - q_e + q_z) dt = \int_0^z \int_{t_j}^{t_{j+1}} \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) dt dz \text{ eq.1}$$

em que:

- c** - fluxo devido a chuva (cm dia^{-1});
- i** - fluxo devido a irrigação (cm dia^{-1});
- qe** - fluxo devido a evapotranspiração (cm dia^{-1});
- qz** - fluxo de água no solo na profundidade **z** (drenagem profunda ou ascensão capilar) (cm dia^{-1});
- θ** - conteúdo volumétrico de água ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);
- z** - coordenada vertical sobre um eixo orientado positivamente para baixo (cm) e
- t** - tempo (dia).

O membro da esquerda da equação 1 representa o somatório de todas as entradas e saídas de água em um elemento de volume do solo de base unitária (1 cm^2) e altura **z** (cm). O membro da direita representa a variação do armazenamento de água no mesmo elemento, no intervalo $t_{j+1} - t_j$. A equação 1 é, portanto, a equação de conservação das massas (9, 52, 54, 56, 62, 69). A determinação dos componentes da equação 1 pode ser feita de diversas maneiras, conforme será abordado ao longo do texto, podendo um dos componentes ser deixado como incôgnita.

O segundo membro da equação 1 é a variação do armazenamento de água, na camada de solo de profundidade **z** com o tempo e pode ser facilmente determinado pela área delimitada por perfis consecutivos de umidade e as coordenadas **0** e **z**.

A variação do conteúdo de água pode ser determinada por medições sucessivas, que podem ser obtidas com bastante precisão, com o uso de uma hidrossonda de neutrons (3, 4, 15, 35, 50, 53, 70, 71). VAN BAVEL *et alii* (70, 71) recomendam o uso de hidrossonda de neutrons para a estimativa da umidade do solo como uma forma de minimizar os efeitos da variabilidade espacial das características físico-hídricas dos solos (33, 48), visto que as leituras são feitas sempre num mesmo ponto. HAVERKAMP *et alii* (35) e BELTRAME e TAYLOR (4) apresentam metodologias e recomendações para calibração e uso da hidrossonda de neutrons na determinação da umidade do solo, evidenciando alternativas para reduzir os erros aleatórios e de calibração.

O fluxo devido a chuva que atinge a superfície do solo ($z = 0$) pode ser facilmente determinado. Pluviômetros ou pluviógrafos medem diretamente o resultado da integração de c no intervalo $t_{j+1} - t_j$. Da mesma forma determina-se o fluxo devido a irrigação i , utilizando-se coletores instalados na área experimental (54).

Os fluxos decorrentes da evaporação na superfície do solo, da transpiração das plantas e da água, na seção de contorno inferior do volume de controle de solo considerado, são os componentes do balanço hídrico mais difíceis de serem determinados (56).

A estimativa da drenagem profunda e a ascensão capilar depende do conhecimento acurado das propriedades físico-hídricas do solo, que são variáveis no espaço e no tempo (16, 48, 54, 56, 62, 70).

O movimento vertical de água no solo é descrito de forma satisfatória por uma equação diferencial oriunda da combinação da equação de Darcy com a equação da continuidade, ambas em uma dimensão. A solução dessa equação depende do conhecimento de funções, relacionando o teor de umidade com o potencial matricial ($\Psi_m(\theta)$), e com a condutividade hidráulica ($K(\theta)$) ou difusividade da água no solo ($D(\theta)$), o que torna a sua utilização bastante complexa e passível de muitos erros (52).

Em muitos trabalhos conduzidos com a finalidade de estudar a dinâmica da água no sistema solo-água-planta-atmosfera, a equação diferencial que descreve o movimento de água no solo tem sido utilizada para estimar fluxos de água a uma dada profundidade do perfil (3, 24, 25, 38, 56, 62, 64, 69, 71). Os trabalhos de ROSE e STERN (62), VAN BAVEL *et alii* (71) e STONE *et alii* (64) são um dos exemplos clássicos da utilização dessa equação para estimar fluxos de drenagem e ascensão capilar para fins do balanço de água na zona radicular da planta. Todavia, VAN BAVEL *et alii* (70) e REICHARDT *et alii* (56) ressaltam a influência da variabilidade espacial do solo, principalmente, no estabelecimento da função $K(\theta)$, o que tem sido minimizado com o uso da técnica de moderação

de neutrons na estimativa do teor de umidade do solo (3, 38, 69, 70, 71). Nas condições edáficas do cerrado, a associação da teoria do movimento da água com o balanço hídrico no solo tem mostrado resultados satisfatórios na estimativa do consumo de água pela cultura do milho, no campo (24, 26).

Em decorrência das dificuldades inerentes a utilização da teoria do movimento de água no solo, algumas simplificações têm sido propostas e testadas em laboratório e no campo. Dentre essas, destaca-se a proposta por BLACK *et alii* (6), que assume um gradiente de potencial total unitário (teor de umidade constante em todo o perfil), ficando o fluxo igual a condutividade hidráulica não-saturada. A teoria assim simplificada foi usada para estimar o fluxo de drenagem profunda em um solo arenoso e, como a condutividade hidráulica varia com o teor de umidade, expressou-se a drenagem profunda como uma função exponencial do teor médio de umidade ou do armazenamento de água no perfil acima da profundidade z considerada. Várias outras pesquisas foram empreendidas, utilizando-se a mesma técnica para estimar a drenagem profunda, obtendo-se resultados satisfatórios (6, 7, 9, 12, 13, 16, 48, 50), inclusive alguns autores (13, 16, 48) derivaram equações que permitem a estimativa direta do fluxo de água, em uma dada profundidade, em função do tempo após a infiltração da água, necessitando apenas da condutividade hidráulica saturada e da inclinação da curva $K(\theta)$ num ponto próximo à saturação.

Outras técnicas desenvolvidas com o intuito de estimar o fluxo de drenagem profunda ou separá-lo do fluxo devido a evapotranspiração, procuraram, de certa forma, evitar o uso direto da função $K(\theta)$. Uma dessas técnicas consiste em estabelecer funções empíricas, geralmente do tipo potencial, relacionando o fluxo de drenagem profunda ao teor médio de água no perfil do solo (46, 57, 73). Entretanto, ao introduzir a planta no sistema, o ajuste da função fica dificultado, o que limita muito a utilização dessa técnica (46, 73). Uma outra forma de estimar a drenagem profunda que dispensa o conhecimento de $K(\theta)$ é a utilização simultânea de perfis

sucessivos de umidade e de potencial total de água no solo, em que é estabelecida uma zona de gradiente nulo, chamada plano de fluxo zero (PFZ). O fluxo acima do PFZ é devido a evapotranspiração ou evaporação e o fluxo abaixo do PFZ é devido a drenagem profunda, podendo, ainda, ser de ascensão capilar quando o PFZ está bem abaixo da zona radicular ou da seção de controle (38, 44, 52, 53, 57). Esse método apresenta limitações, dentre elas, a dificuldade de determinação do PFZ nos períodos chuvosos ou a ocorrência de mais de um PFZ nos períodos secos (53), podendo, inclusive, ora subestimar, ora superestimar a drenagem, dependendo da posição do PFZ (38). KALMS e IBERNON (38) afirmam ainda que esse método só proporciona resultados confiáveis em períodos secos bem definidos, embora REICHARDT *et alii* (53) considerem este método com vantagens em relação a equação de Darcy.

Ainda dentro do grupo de métodos destinados a determinar o fluxo de drenagem sem o conhecimento de $K(\theta)$, existe o que se baseia na variação de umidade, ocorrida abaixo da zona efetiva das raízes até que se atinja o limite da capacidade de campo (15) e o que se baseia na descontinuidade nas curvas do teor de umidade em função do tempo ($\theta(t)$) (44).

As soluções analíticas de equações diferenciais de fluxo são complexas, o que tem conduzido os pesquisadores ao desenvolvimento de soluções numéricas. CAMERON (11) usou a teoria de fluxo de água em solo não saturado para prever o teor de umidade do solo, estabelecendo a condutividade hidráulica e a difusividade como funções exponenciais do déficit de água no solo (capacidade de campo menos teor atual) e resolvendo numericamente a equação diferencial de fluxo. As maiores dificuldades encontradas foram devido à grande variabilidade espacial do solo, histerese e estimativa dos parâmetros das funções difusividade e condutividade hidráulica.

Uma série de fatores que interagem no sistema solo-água-planta-atmosfera regulam o processo de drenagem ou de ascensão capilar. VAN BAVEL *et alii* (70) ressaltam o caráter dinâmico da água no solo, demonstrado pela presença de gradientes de potencial total apreciáveis nas camadas inferiores do

perfil do solo e pela ocorrência de pequenos fluxos de drenagem profunda, são detectáveis com a hidrossonda de neutros. WILCOX (73) e MILLER e AARSTAD (45) mostram que logo após chuva ou irrigação, a planta extrai água que se encontra no processo de drenagem e que essa extração contribui para um decréscimo mais rápido do fluxo de drenagem profunda, com o tempo, quando comparado com uma parcela não cultivada e coberta para evitar a evaporação. Em balanços hídricos realizados em parcelas cultivadas, a redução da taxa de drenagem profunda tem sido observada como consequência do aumento da densidade radicular ou do volume de solo explorado pelas raízes das plantas (9, 25, 50, 56) e mesmo em decorrência do aumento da demanda de evapotranspiração (45) e da atividade fitossintética da planta (50). Essas observações constituem informações de grande valia para o desenvolvimento de práticas de manejo do solo e água (56).

Embora as técnicas de estimativas da drenagem profunda e ascensão capilar careçam de aprimoramento, os pesquisadores (9, 11, 12, 15, 38, 44, 45, 46, 52, 53, 54, 56, 62, 64, 65, 70, 71, 73) são unânimes em ressaltar a importância desses componentes do balanço hídrico, quer para fins da determinação da evapotranspiração real das plantas, quer pelo efeito direto da drenagem profunda no transporte vertical de defensivos agrícolas (53, 64). Entretanto, vários autores têm desprezado esses componentes ao estudarem a dinâmica de água no solo e a extração pelas plantas, com sérios erros no balanço hídrico (12, 50, 52, 54, 56, 62, 65, 71), principalmente em condições de precipitação e irrigação frequentes ou onde o fluxo ascendente é facilitado pela proximidade do lençol freático (54, 56, 71).

O fluxo de evapotranspiração da cultura (q_e) pode ser estimado por intermédio de vários métodos que levam em consideração o efeito do clima, das características da cultura, das condições locais e das práticas de manejo agrícola (19). Entretanto, na maioria das vezes, esse componente do balanço é deixado como incôgnita, se o objetivo é determiná-lo em condições de campo.

O fluxo de evapotranspiração da cultura é a soma do fluxo de transpiração pela cultura e da evaporação pela superfície do solo. Durante a fase de cobertura total do solo pela planta, o fluxo de evaporação é desprezível (68). Todavia, após a semeadura e durante a fase inicial de crescimento ele deve ser considerado, particularmente, quando a superfície do solo é umedecida com frequência por chuva e por irrigação.

O processo de evaporação da água de um solo sem vegetação, na ausência do lençol freático, foi estudado por Lemon em 1956 (54), constatando-se a ocorrência de três estágios definidos. O primeiro estágio é caracterizado por uma taxa de evaporação constante (potencial) dependente das condições atmosféricas reinantes junto ao solo. No segundo, a taxa de evaporação decresce segundo uma função linear do teor de umidade médio do perfil do solo, sendo menos sujeita às condições atmosféricas. O terceiro estágio caracteriza-se por um movimento bastante lento da água, principalmente na fase de vapor, decorrente da baixa condutividade hidráulica do solo.

DIAS (18) pesquisou a evaporação da água do solo na presença do lençol freático, em condições de equilíbrio dinâmico, baseando-se na equação proposta por Gardner em 1958. Foram usados três tipos de solo, dois Latossolos Vermelho-Escuro distrófico (LED) e um Glei Pouco Húmico (HGP), simulando diferentes profundidades do lençol freático e níveis de demanda evaporativa. Os valores da taxa de evaporação estimados aproximaram-se bastante dos medidos, especialmente no solo de cerrado (LED) e, quando fixou-se a profundidade do lençol freático em 75 cm para esse mesmo solo, a evaporação máxima (limite) foi de $0,71 \text{ cm dia}^{-1}$.

Os efeitos do vento e da radiação sobre a evaporação da água do solo foram pesquisados por HANKS *et alii* (34), constatando que não houve diferença significativa entre eles e que o erro cometido na estimativa da evaporação de um solo inicialmente úmido, assumindo condições isotérmicas, não ultrapassa 10%.

Uma solução analítica da equação diferencial de fluxo, proposta por Crank em 1956, foi usada por BLACK *et alii* (6), para estimar a evaporação da água de um solo arenoso após chuva ou irrigação, considerando as condições isotérmicas e a difusividade constante. Os valores da evaporação acumulada estimados aproximaram-se bastante dos medidos, não apresentando erros acima de 5%.

O efeito do clima no consumo de água de uma cultura é quantificado, segundo DOORENBOS e PRUITT (19), pela evapotranspiração de referência (ET_o), que é definida como sendo a taxa de evapotranspiração de uma superfície ampla com 8 a 15 cm de altura, coberta com grama verde de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo completamente o solo e sem déficit de água no solo. Esse conceito é um aprimoramento do conceito de evapotranspiração potencial, desenvolvido por Penman em 1948.

Existem inúmeros modelos destinados à estimativa da evapotranspiração de referência ou potencial. TANNER (66) discute alguns desses métodos e DOORENBOS e PRUITT (19) apresentam um roteiro para a utilização de quatro métodos modificados para estimar ET_o , a partir de dados climáticos diários, sendo que os melhores resultados têm sido obtidos com o método de Penman modificado (19).

Para considerar o efeito das características fisiológicas de uma planta na evapotranspiração, conceituou-se a evapotranspiração da cultura (ET_c), que é a taxa de evapotranspiração de uma cultura livre de doenças, cultivada em uma área relativamente grande, sob condições ótimas de umidade e fertilidade do solo e cujo potencial total de produção dessa cultura, em um dado meio ambiente, seja atingido (19). TANNER (68) e TANNER e JURY (67) denominam evapotranspiração máxima (ET_{max}) a evapotranspiração da cultura nas mesmas condições referidas.

Conforme mencionado anteriormente, o fluxo de evapotranspiração de uma cultura pode ser determinado através do balanço de água no solo, bastando para isso, explicitá-lo na equação 1.

A utilização de lisímetros é um dos métodos que possibilita a obtenção direta de todos os componentes do balanço de água, porém esse método apresenta uma série de limitações que se resumem, basicamente, na dificuldade de reprodução no lisímetro das condições naturais do campo (66).

Em se tratando do balanço de água no solo, nas condições de campo, a medição dos componentes da equação de balanço é bastante difícil e passível de muitos erros. Um dos componentes que mais concorre para o aumento dos erros na estimativa do fluxo de evapotranspiração, usando o balanço de água no solo, é o fluxo de água na zona radicular, na forma de drenagem profunda ou de ascensão capilar (9, 12, 15, 38, 44, 45, 46, 50, 52, 53, 54, 56, 62, 64, 65, 70, 71, 73). Mesmo com essas dificuldades, essa técnica vem sendo usada com sucesso na estimativa do fluxo de evapotranspiração de culturas, apresentando uma precisão aceitável e com a vantagem de que a determinação é feita no campo, com a planta submetida às reais interferências edafoclimáticas e hídricas.

A determinação da evapotranspiração também pode ser feita a partir da E_{To} , mediante a utilização de um fator denominado coeficiente de cultura (K_c), que varia com o tipo de cultura, com a fase fenológica em que a planta se encontra e com algumas condições climáticas (19). DOORENBOS e PRUITT (19) apresentam um roteiro para a escolha dos valores de K_c , para diversas culturas, em diferentes estádios de crescimento e condições climáticas. Para a cultura do milho, segundo os autores, o valor de K_c pode atingir até 1,2 na fase que inicia com a cobertura total do solo pela planta, até o início da maturação dos grãos. MATZENAUER *et alii* (43), trabalhando com milho cultivado em lisímetros no período das águas no Rio Grande do Sul, encontraram valores de K_c de até 1,10, na fase pendoamento-espigamento, quando usou o método de Penman para estimar a evapotranspiração potencial, ao passo que quando foi usado o método do Thornthwaite, o valor de K_c atingiu 1,34 e 1,28, nos meses de dezembro e janeiro, respectivamente. As diferenças no K_c , obtidas pelos dois métodos, devem-se, provavelmente, a erro na metodologia preconizada por

Thornthwaite para determinação da evapotranspiração potencial, uma vez que essa metodologia é baseada na temperatura média do ar.

Na região dos cerrados, ESPINOZA (24) verificou que uma maior densidade de plantio apresenta coeficiente de cultura elevado, chegando até um valor, de 1,38, no período de 87 a 94 dias após a emergência, no caso de uma densidade de 80.000 plantas por ha^{-1} e de 0,83, no mesmo período, para uma densidade de 20.000 plantas por ha^{-1} , comprovando a observação de YAO e SHAW (76) sobre o maior consumo de água por populações de milho mais densas. Em outra pesquisa, também conduzida no cerrado, foram encontrados valores de até 1,2, no período de maior consumo de água pela cultivar Cargilllll plantada na época das secas (26). Em ambos trabalhos (24, 26) a evapotranspiração potencial foi estimada a partir de dados de evaporação do tanque classe A, instalado nas proximidades do experimento, usando um coeficiente do tanque de 0,85.

Na tentativa de estimar diretamente a evapotranspiração da cultura sem limitação de água, RITCHIE (59) propôs um método prático, onde a evaporação é calculada separadamente da transpiração, usando relações empíricas combinadas. A evaporação, numa primeira fase, é considerada igual a potencial e numa segunda é estimada através de uma relação empírica proposta por BLACK *et alii* (6), enquanto a transpiração é estimada por uma função que modifica a evaporação potencial em decorrência do aumento do índice de área foliar. O teste do modelo apresentou erros inferiores a 1 mm dia^{-1} na estimativa da evapotranspiração de uma cultura plantada em linhas. TANNER e JURY (67) propõem um modelo semelhante onde a evapotranspiração da cultura é obtida pela soma da transpiração e evaporação, porém usando funções diferentes para estimar cada um dos componentes.

Dentre outros fatores que afetam a evapotranspiração de uma cultura, a disponibilidade de água do solo é um dos mais importantes (19). Em um modelo destinado a estimar a depleção de água no solo, a partir de dados de clima, planta e solo, JENSEN *et alii* (37) incluem o efeito do déficit no

coeficiente de cultura, na forma de um novo fator relacionado à água disponível do solo. Os resultados estimados para a cultura da alfafa aproximaram-se bastante dos valores medidos em lisímetro e com hidrossonda de neutrons.

A quantidade de água do solo disponível às plantas não é constante. O solo funciona como um reservatório que constantemente tem seu conteúdo alterado por entradas e saídas, com magnitudes variáveis com o tempo e espaço. Assim, a disponibilidade de água do solo deve ser encarada sob o aspecto dinâmico e dependente das interações do sistema solo-água-planta-atmosfera (54).

O conceito de disponibilidade de água para as plantas trouxe, por muitos anos, controvérsias entre pesquisadores. A principal causa das controvérsias é, provavelmente, a falta de uma definição física do conceito (54). Do ponto de vista da disponibilidade da água para as plantas, definiu-se a "água disponível", correspondendo à água retida entre os potenciais de $-0,033$ MPa (capacidade de campo, **CC**) e $-1,5$ MPa (ponto de murcha permanente, **PMP**), entretanto, este conceito estático de água disponível não representa a realidade, pois há evidências de que a planta pode extrair água abaixo do **PMP** e acima da **CC**, inclusive pode entrar em murchamento com o solo próximo a **CC** (55). Uma outra razão é que como o sistema solo-água-planta-atmosfera é dinâmico, ele não pode ser definido por um único ponto de energia estático.

Atualmente, a disponibilidade de água do solo às plantas é vista de maneira dinâmica, podendo variar de situação para situação, mesmo para o mesmo solo e a mesma cultura. O conceito baseia-se na mobilidade da água. Toda vez que o fluxo de água do solo para a raiz é de uma intensidade tal que supre a demanda de água da planta e da atmosfera, a água é disponível. A planta entra em déficit de água ou murcha, quando o fluxo deixa de suprir esta demanda (28, 55).

Este conceito de disponibilidade de água é bastante amplo. Ele mostra que qualquer fator que afeta a mobilidade da água afeta sua disponibilidade. Estes fatores podem ser do solo, da planta e da atmosfera (55).

A influência das condições dinâmicas do sistema solo-água-planta-atmosfera, na disponibilidade de água para as plantas, tem sido estudada por muitos pesquisadores (28, 29, 45, 55, 61, 68, 71, 74), principalmente com relação a determinação dos limites superior e inferior de água disponível. GARDNER (28) apresenta soluções da equação de fluxo para descrever matematicamente o processo de absorção de água pelas plantas e faz uma análise dos diversos fatores que, interagindo no sistema solo-água-planta-atmosfera, influenciam a disponibilidade e a absorção de água.

A determinação do limite superior de água disponível, levando em consideração a drenagem profunda e a demanda por evapotranspiração, foi discutida por vários autores (45, 61, 74, 75). Um novo conceito de limite superior que incorpora o consumo de água da planta, após a irrigação, até o momento em que a drenagem profunda torna-se desprezível, é apresentado por WILCOX (74). Já WILCOX (75) e MILLER e AARTAD (45) analisam o efeito da demanda atmosférica na taxa de drenagem profunda e na determinação do limite superior. Por outro lado, RITCHIE (61) leva em consideração apenas a drenagem profunda e estabelece um critério para a determinação do limite superior numa camada de solo não cultivado, em condições de campo.

Assim, como o limite superior, o limite inferior de água disponível sofre os efeitos das condições dinâmicas do sistema solo-água-planta-atmosfera (28). GARDNER (28) descreve a influência da extensão do sistema radicular e da taxa de transpiração no murchamento da planta e mostra que sob condições de alta taxa de transpiração, o murchamento ocorre com potenciais de água no solo relativamente elevados. RITCHIE (61) aponta uma série de fatores que, limitando o desenvolvimento do sistema radicular, podem mascarar o valor do limite inferior de água disponível, quando da sua determinação em condições de campo.

Nos solos sob cerrado, em que algumas características químicas limitam o desenvolvimento radicular da maioria das culturas, a disponibilidade de água do solo fica ainda mais

restringida. ESPINOZA (25) observou que com cultura de milho no cerrado, 85-90% da água é extraída nos primeiros 60 cm de profundidade, o que permitiria um esgotamento bastante rápido da água disponível pelas plantas. VASCONCELLOS *et alii* (72) encontraram que o sistema radicular do milho concentra-se na camada de 0 a 30 cm do perfil do solo e que a rotação de cultura com soja e mucuna proporciona um desenvolvimento maior do sistema radicular, favorecendo a absorção de nutrientes e a maior tolerância ao déficit hídrico.

Embora na atualidade o conceito de limite inferior de água disponível esteja relacionado às condições dinâmicas do sistema solo-água-planta-atmosfera, ainda tem sido usado, devido ao seu valor prático, o conceito de ponto de murcha permanente (PMP) que, em síntese, é uma tentativa de correlacionar o estado da água na planta com o estado da água no solo, em termos de potencial (54). BERNARDO (5) explica que os potenciais relativos ao PMP podem variar de -0,5 a -2,5 MPa, dependendo da planta ou condição ambiental, porém, apesar dessa amplitude parecer muito grande, em muitos solos ela representa uma variação muito pequena no seu teor de umidade. De fato, FERNANDES *et alii* (27) constataram que o PMP para diversos Latossolos sob cerrado, determinado pelo método fisiológico, correlaciona com teores de umidade retidos à potenciais superiores a -1,5 MPa, porém, as diferenças nos teores de umidade retidos na faixa de -0,5 a -1,5 MPa são inferiores a 3%, o que é, certamente, inferior a magnitude das incertezas experimentais (28, 30) e desprezível em termos de água disponível às plantas. GARDNER (28) afirma que o potencial da água na planta diminui com a diminuição do potencial da água no solo, sendo esta redução mais acentuada após -1,5 MPa no solo. Entretanto, GARDNER e NIEMAN (30) acham que, embora nenhum limite simples, para todos os processos fisiológicos da planta, pode ser estabelecido, o teor de umidade retido a -1,5 MPa continua servindo de forma prática em muitas situações, o que também tem sido aceito por muitos autores (5, 30, 31, 47, 51).

Pelo visto, a disponibilidade de água do solo às plantas,

tendo o ponto de murcha permanente (PMP) como o seu limite inferior, é objeto de muita discussão, principalmente quando se considera o fenômeno sob o aspecto dinâmico. Entretanto, critica-se o fato de que, apesar das novas teorias sobre movimento de água no solo, até o presente momento não se desenvolveu outro parâmetro capaz de substituir o PMP (54), o que lhe confere, até os dias de hoje, ampla aplicação prática nos dimensionamentos e manejo de projetos de irrigação.

Como foi mostrado anteriormente, a disponibilidade de água para as plantas é um problema complexo devido à própria complexidade do sistema (55), tanto é que RITCHIE (61) e TANNER (68) recomendam a determinação dos limites superior e inferior de água disponível nas condições de campo e conceituam a "água extraível" como sendo a quantidade total de água extraída pela planta, desde a última chuva ou irrigação até a taxa de transpiração tornar-se nula. Nestas condições a planta é submetida a todos os fatores que afetam a disponibilidade de água, dentre eles a distribuição do sistema radicular, a demanda de evapotranspiração e as características de retenção e transmissão de água do solo.

[A água disponível no solo tem um papel decisivo em todos os processos que ocorrem em um vegetal. Um dos aspectos mais importantes, causados pela baixa disponibilidade hídrica, é a redução na evapotranspiração da cultura (10).] Após chuva ou irrigação, o conteúdo de água do solo é reduzido, principalmente, pela evapotranspiração. Na medida em que o solo seca, a taxa de transmissão de água do solo é reduzida até o momento (ponto crítico), em que ela se torna menor que a taxa necessária para manter um dado fluxo de evapotranspiração da cultura, ou seja, o efeito das características físico-hídricas do solo tornam-se mais limitantes que a demanda evaporativa da atmosfera (2, 10, 17, 19, 26, 28, 58, 60, 68). A partir desse momento, a evapotranspiração da cultura reduz do seu valor máximo e inicia uma fase de decréscimo do fluxo de evapotranspiração (19, 68).

Embora o fenômeno da redução da evapotranspiração, em decorrência do decréscimo da disponibilidade de água, pareça

simples como foi apresentado, ele é bastante complexo. Enquanto a evaporação pela superfície do solo, nessa fase, é limitada pelo fluxo capilar de água no interior do solo, a transpiração depende também das características fisiológicas da planta e do desenvolvimento do sistema radicular (68). Uma descrição detalhada, inclusive matemática, do efeito das condições dinâmicas do solo e da atmosfera na transpiração da planta é apresentada por GARDNER (28), ao passo que HISAO (36) faz uma abordagem completa da resposta da planta ao estresse hídrico, enfocando principalmente os efeitos nos diversos processos fisiológicos.

As plantas comportam-se diferentemente ao estresse hídrico; inclusive dentro de um mesmo tipo de planta ocorrem respostas diferentes dos processos fisiológicos, ao estresse hídrico (36). Segundo BRUNINI *et alii* (10), algumas variedades da cultura do milho são mais ou menos sensíveis ao efeito da disponibilidade de água na evapotranspiração. Esses autores observaram que as variedades que possuem o fator latente reduzem a evapotranspiração de maneira muito mais acentuada do que as que não o possui.

[Como o efeito da disponibilidade de água na evapotranspiração varia com a cultura e é condicionado, principalmente, pelas características de retenção de água do solo e do sistema radicular da cultura e pelos fatores meteorológicos, que determinam a demanda de transpiração (19, 68), recomenda-se que as relações entre a evapotranspiração e a depleção de água no solo, durante a fase de decréscimo, sejam estabelecidas experimentalmente no campo (68)]. A relação entre a evapotranspiração real e máxima (que depende além da demanda climática, da cobertura do solo pela planta) é freqüentemente considerada nas funções que relacionam a evapotranspiração real com a umidade do solo, possibilitando a determinação da evapotranspiração real a partir de informações climáticas (evapotranspiração potencial ou de referência) e da planta (K_c), e da umidade do solo.

Muitas funções, que consideram o efeito da água do solo na relação entre a evapotranspiração real e máxima ($E_{Tr}/$

ETmax), têm sido desenvolvidas e testadas sob a mais variadas condições edafoclimáticas e tipos de planta (2, 3, 8, 9, 17, 20, 32, 37, 42, 58, 60, 63, 68). Algumas funções relacionam E_{Tr}/E_{Tmax} com o teor de umidade da zona radicular ou de uma profundidade arbitrária; todavia, muitas delas são baseadas na quantidade de água disponível na zona radicular, considerando como limites superior e inferior a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, respectivamente (68).

A forma das funções é das mais variadas, porém, a maior parte delas considera que E_{Tr}/E_{Tmax} é igual a unidade, até que a água disponível seja reduzida ao "ponto crítico (θ_c), a partir do qual E_{Tr}/E_{Tmax} entra na fase de decréscimo; tanto os valores de θ_c , quanto a forma das funções durante a fase de decréscimo são também bastante variadas (68).

Uma revisão detalhada sobre a influência da umidade do solo na evapotranspiração das plantas, em que os tipos de funções e valores do ponto crítico foram compilados, é apresentada por TANNER (68) e BORG (8). Entretanto, a teoria mais utilizada para descrever a redução da evapotranspiração de uma cultura, em função do decréscimo do teor de umidade do solo é a proposta por DENMEAD e SHAW (17), que considera um decréscimo linear da transpiração com o decréscimo do teor de umidade do solo, a partir de um dado teor crítico de umidade (8).

O valor do ponto crítico onde ocorre o decréscimo na relação E_{Tr}/E_{Tmax} não só depende da habilidade da planta em extrair água e da demanda de evapotranspiração, mas principalmente das propriedades do solo. Em solos onde a maior parte da água disponível está submetida à potenciais elevados, o decréscimo só irá ocorrer quando a maior parte da água disponível tenha sido extraída, ao passo que em solos onde o potencial cai bruscamente com o decréscimo da umidade, o decréscimo de E_{Tr}/E_{Tmax} irá ocorrer com o teor de umidade do solo (θ_c) ainda alto (17).

Um grande número de pesquisas, desenvolvidas em condições edafoclimáticas e tipos de planta variadas, indicaram valores diferentes para o ponto crítico (2, 3, 8, 9, 17, 42,

58, 60, 68). A influência da demanda de evapotranspiração no valor de θ_c foi verificada por DENMEAD e SHAW (17), cultivando plantas de milho em vaso. Os autores constataram que quanto maior a demanda, tanto maior é o valor do ponto crítico (θ_c). Contrariamente, RITCHIE *et alii* (58) e RITCHIE (60), pesquisando sorgo granífero, algodão e milho, no campo, observaram que a relação E_{Tr}/E_{Tmax} permanece constante, até que 75% da água disponível tenha sido extraída, independentemente da demanda climática.

Na região do cerrado do Brasil Central, um modelo foi desenvolvido e testado em um campo cultivado com milho, utilizando as proposições feitas por DENMEAD e SHAW (17). Os teores de umidade estimados pelo modelo, nas diversas camadas do perfil do solo, apresentaram uma precisão de 10%, comprovando a validade dos resultados de DENMEAD e SHAW (17) para as condições estudadas (32). Valores do ponto crítico da mesma ordem de grandeza foram encontrados para outras plantas, nas condições brasileiras, por BRUNINI *et alii* (9), e BARROS FERREIRA (3), conduzindo experimentos no campo.

Diferenças nos valores do ponto crítico, para uma dada planta, sob uma dada demanda climática, são atribuídas por RITCHIE *et alii* (58) e RITCHIE (60) ao desenvolvimento diferenciado do sistema radicular das plantas, que explorando volumes diferentes de solo, comportam-se também de forma distinta quando submetidas ao estresse hídrico.

Um sumário dos valores de θ_c é apresentado por TANNER (68), que constata ainda que a maioria dos valores estão entre 25 e 35% da água extraível, independentemente das diferenças no solo, na planta, na demanda climática, na distribuição do sistema radicular, na forma de considerar a água extraível e dos erros, devido a chuva ou amostragem inadequada.

[A redução da taxa de evapotranspiração, como consequência do déficit de água no solo, é responsável por acentuadas reduções na produtividade, em virtude dos efeitos sobre diversos processos fisiológicos, sendo o crescimento expansivo o mais afetado (10)]. Um estudo muito detalhado dos efeitos

do estresse hídrico nos processos fisiológicos da planta é apresentado por HISAO (36). [Já DENMEAD e SHAW (17) verificaram que a partir do momento que o teor de umidade do solo atinge o ponto crítico, a planta virtualmente cessa de assimilar CO_2 e, quanto maior for o número de dias com o teor de umidade de abaixo do ponto crítico, maior é a redução no crescimento.]

Não existe forma exata e precisa para descrição de um fenômeno tão complexo como o da dinâmica da água no sistema solo-água-planta-atmosfera. Esta dificuldade é inerente ao fenômeno, tão complexo em suas relações espaço-tempo (54). Com isso, não se pretende dizer que o problema é insolúvel. Cada caso deve ser estudado isoladamente, pela avaliação da dinâmica da água no solo e suas interrelações com a planta e atmosfera. Assim foi proposto um estudo, considerando as condições particulares de solo, de cultura e de clima.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. *Características Gerais da Área*

O experimento foi conduzido em um Latossolo Vermelho-Escuro álico, fase relevo suave ondulado cerrado, em área cultivada por mais de duas décadas, no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo - EMBRAPA, Município de Sete Lagoas, MG, cuja latitude, longitude e altitude são $19^{\circ}28'S$, $44^{\circ}15'08''$ Gr. e 732 m, respectivamente.

Dados meteorológicos coletados na área, no período de 1931 a 1982, mostram que embora a precipitação média anual seja de 1340 mm, os períodos de chuva e seca são bem definidos. A temperatura média anual está em torno de $22^{\circ}C$, cuja diferença entre as médias do mês mais frio e a do mais quente está em torno de $5^{\circ}C$. A evaporação (evaporímetro de PICHE) é maior nos meses de agosto e setembro (124,5 e 131,5 mm) e menores em dezembro, fevereiro e abril (média de 69,4 mm). A umidade relativa alcança valores de aproximadamente 62%, em agosto e setembro, e 77%, no período de dezembro a fevereiro. A insolação média máxima ocorre em agosto (287 h) e mínima em dezembro (169 h) (1).

A vegetação original do local era cerrado, tendo sido desbravada para a introdução das mais diversas culturas

destinadas à pesquisa agropecuária, embora, nos últimos dez anos, têm-se plantado, predominantemente, milho e sorgo.

3.2. *Instalação da Parcela Experimental e Manejo da Irrigação*

A cultura utilizada foi o milho (*Zea may* L.), cuja escolha da cultivar Cargill 111-S deve-se a boa aceitação comercial e boa performance em condições de agricultura irrigada.

A área experimental foi preparada de forma convencional (aração, gradagem leve e sulcamento). A adubação consistiu de 250 kg ha⁻¹ da formulação 8-28-16 e 10 kg ha⁻¹ de sulfato de zinco, no plantio e 60 kg ha⁻¹ de nitrogênio, em cobertura, parcelados aos 35 e 45 dias após o plantio. O plantio foi executado manualmente com um metro entre fileiras e dez sementes por metro de linha, obtendo uma população final, após desbaste, de 50.000 plantas por hectare.

O experimento constituiu de duas parcelas com dimensões de 12 metros por 12 metros, marcadas dentro de uma área maior, contínua e uniforme, de aproximadamente um hectare, sendo devidamente separadas por uma bordadura maior que o alcance máximo dos jatos dos aspersores utilizados na irrigação.

As duas parcelas receberam tratamentos culturais normais, entre eles, cultivo com cultivador tração animal e controle da lagarta do cartucho.

Ambas parcelas receberam irrigações com um turno de rega de aproximadamente sete dias, até o estágio de pendramento, a partir do qual uma das parcelas (parcela 02) foi submetida ao déficit hídrico. As lâminas de irrigação foram aplicadas, considerando a evapotranspiração da cultura ocorrida no período anterior, obtido a partir da evapotranspiração de referência, corrigida pelo coeficiente cultural médio do período, segundo DOORENBOS e PRUITT (19). O sistema de irrigação utilizado foi do tipo aspersão convencional, com taxas de aplicação de água sempre inferiores a velocidade de infiltração básica, para evitar escoamento superficial.

3.3. *Monitoramento da Umidade e do Potencial da Água no Solo*

Uma hidrossonda de neutrons, modelo 3330 da TROXLER, foi usada para o acompanhamento da umidade do solo, durante todo o ciclo da cultura. As leituras foram feitas diariamente, de 20 em 20 cm até a profundidade de 160 cm, sendo utilizados quatro tubos de acesso de alumínio, instalados em cada uma das duas parcelas. As leituras foram convertidas para teores de umidade volumétricos, mediante uma equação de calibração previamente estabelecida para o local do experimento, segundo a metodologia apresentada por BELTRAME e TAYLOR (4).

O potencial matricial de água no solo na faixa de 0 a -1,500 MPa foram estimados, utilizando-se blocos de resistência elétrica revestidos com gesso, instalados de 20 em 20 cm até a profundidade de 160 cm, com duas repetições em cada parcela. As leituras foram feitas diariamente no mesmo horário das leituras com a hidrossonda de neutrons e convertidas em potenciais matriciais por intermédio de uma equação de calibração, determinada em laboratório. O potencial total de água no solo foi obtido pela soma do potencial matricial e gravitacional, tomando como referência a superfície.

3.4. *Características Morfológicas, Físico-Hídricas e Químicas do Solo*

3.4.1. *Descrição Morfológica do Solo*

Junto a área experimental foi aberta uma trincheira com 200 cm de profundidade, onde foi descrito morfológicamente o perfil do solo, segundo a metodologia descrita por LEMOS e SANTOS (40). Após a separação dos horizontes do perfil do solo, foram coletadas amostras para determinação das demais características físico-hídricas e químicas.

3.4.2. *Análises Granulométrica e Química*

Foram feitas análises granulométricas e química de todos os horizontes do perfil do solo, até a profundidade de

200 cm, baseadas na metodologia descrita em EMBRAPA (21).

3.4.3. *Densidade do Solo*

A densidade de partículas (D_p) foi determinada pelo método do balão volumétrico e a densidade global (D_g) pelo método do anel volumétrico, utilizando-se três amostras colhidas em cada horizonte da trincheira usada na descrição morfológica do perfil do solo e em outras duas abertas dentro do experimento, segundo a metodologia apresentada em EMBRAPA (21).

3.4.4. *Porosidade Total*

A porosidade total foi estimada através da densidade global e de partículas, mediante a relação $PT = 100 (1 - D_g/D_p)$, onde PT é a porosidade total (%), D_g e D_p as densidades global e de partículas ($g\ cm^{-3}$), respectivamente, conforme descreve EMBRAPA (21).

3.4.5. *Retenção de Água*

A partir de amostras não deformadas, determinaram-se os teores de umidade em equilíbrio com os potenciais 0, -0,006, -0,010, -0,030, -0,050, -0,080, -0,100, -0,300, -0,500, -1,000 e -1,500 MPa, por dessorção, utilizando o sistema de membrana e placa porosa, descrito em EMBRAPA (21). Os teores de umidade em peso foram convertidos para volume, multiplicando-os pelos respectivos valores da densidade global.

3.4.6. *Limites Superior e Inferior da Água Disponível*

O limite superior de água disponível foi determinado no campo, segundo a metodologia descrita por RITCHIE (61), que consistiu da amostragem diária do solo, com três repetições em uma bacia de aproximadamente $16\ m^2$, previamente saturada e coberta com lona plástica para evitar evaporação. As amostragens foram feitas de 20 em 20 cm até a profundidade de

120 cm e os teores de umidade em peso, determinados gravimetricamente convertidos para volume, foram usados para calcular a lâmina de água armazenada na camada de 0 a 100 cm do perfil do solo. Foi ajustada uma função, relacionando o armazenamento de água na camada de 0 a 100 cm (A_{100}), e o número de dias após a saturação da bacia. Considerou-se que o solo atingiu o limite superior de água disponível (Capacidade de Campo), quando a variação do armazenamento (ΔA_{100}) era inferior a $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$. O resultado obtido foi comparado com a lâmina de água submetida à $-0,010$ e $-0,030$ MPa e com informações na literatura.

O limite inferior de água disponível foi tomado como sendo a lâmina de água retida à $-1,500$ MPa, determinado em laboratório, segundo EMBRAPA (21), dadas as dificuldades de determinação desse parâmetro no campo.

3.5. *Dados Climatológicos e Estimativa do Fluxo de Evapotranspiração de Referência*

Os dados meteorológicos, com exceção da precipitação, foram obtidos na Estação Climatológica Principal de Sete Lagoas, localizada a 3 km do local do experimento, aproximadamente.

O fluxo de evapotranspiração de referência (E_{To}) foi estimado em base diária, mediante a metodologia desenvolvida por PENMAN (49), utilizando-se um programa de computador na linguagem BASIC, ajustado por COUTO *et alii* (14).

3.6. *Matéria Seca e Área Foliar*

Foram coletadas, aproximadamente, de 15 em 15 dias, as plantas em um metro de fileira, aleatoriamente, com duas repetições, nas proximidades de cada parcela, para determinação da altura das plantas, do número de folhas, da área foliar e peso da matéria seca das folhas, do colmo, do pendão e das espigas. A área foliar foi determinada, usando um medidor de área

modelo LI 3000 e acessório LI 3050A da LAMBDA, e o índice de área foliar (IAF) foi calculado, visando sua comparação com o coeficiente de cultura (Kc). Até aos 76 dias após o plantio (DAP), as duas parcelas foram consideradas como tratamentos iguais de irrigação, sendo o peso de matéria seca das diversas partes da planta e o IAF considerados como a média aritmética dos valores das duas parcelas. Após os 76 DAP, com a suspensão da irrigação da parcela 02, apenas o peso de matéria seca foi determinado, considerando, logicamente, as duas parcelas como tratamentos distintos.

3.7. Balanço de Água no Solo

Os dados coletados foram processados e analisados de acordo com a teoria do balanço hídrico do solo, conforme descreve REICHARDT (54) na equação 1. Entretanto, integrando essa equação em relação ao tempo e à profundidade, obtêm-se os valores de cada componente do balanço no intervalo de tempo e profundidade considerados, gerando a equação mais comumente empregada em estudos de balanço hídrico:

$$C + I - Q_e + Q_z = \Delta Az \quad \text{eq. 2}$$

em que:

- C - lâmina de chuva (cm);
- I - lâmina de irrigação (cm);
- Q_e - lâmina de evapotranspiração (cm);
- Q_z - lâmina de drenagem profunda ou de ascensão capilar (cm) e
- ΔAz - variação do armazenamento de água na camada de solo de profundidade z (cm).

O balanço foi realizado nos períodos de 42 a 60 DAP, 60 a 84 DAP, 84 a 108 DAP e 108 a 115 DAP, que compreendem os estádios da cultura mais importantes sob o aspecto de consumo de água. Os componentes da equação 2, para cada período

estudado, foram determinados isoladamente da forma como será descrito a seguir.

3.7.1. Chuva e Irrigação

A lâmina de chuva (C) foi medida diariamente por intermédio de um pluviômetro instalado na área do experimento, para minimizar o efeito das variações locais.

A lâmina de irrigação (I) foi medida em três baterias de seis coletores instalados em clareiras abertas na cultura, nas direções transversal e longitudinal das parcelas. Os coletores foram colocados sobre suportes, 30 cm acima do solo e as clareiras destinaram-se a reduzir a influência das plantas nos jatos de água dos aspersores.

3.7.2. Variação do Armazenamento de Água no Solo

O volume de controle, considerado para o balanço, que corresponde a camada do perfil do solo de área unitária, foi tomado entre as coordenadas $z_1 = 0$ cm e $z_2 = 100$ cm, visto que a máxima profundidade efetiva do sistema radicular do milho, nas condições do trabalho, não atinge 100 cm (72).

A variação do armazenamento de água no volume de controle, num intervalo de tempo qualquer $t_{j+1} - t_j$, foi calculada, utilizando-se o membro da direita da equação 1 que, em termos práticos, nada mais é que a área compreendida entre os perfis de umidade nos tempos t_j e t_{j+1} e entre as coordenadas $z_1 = 0$ cm e $z_2 = 100$ cm (Figura 1-a).

3.7.3. Drenagem Profunda e Ascensão Capilar

As lâminas de drenagem profunda ou de ascensão capilar (Qz) foram estimadas, utilizando-se a técnica testada por REICHARDT *et alii* (53), baseada na metodologia proposta por Geisel, Lorich e Renger em 1970.

Conhecendo-se a distribuição do gradiente do potencial

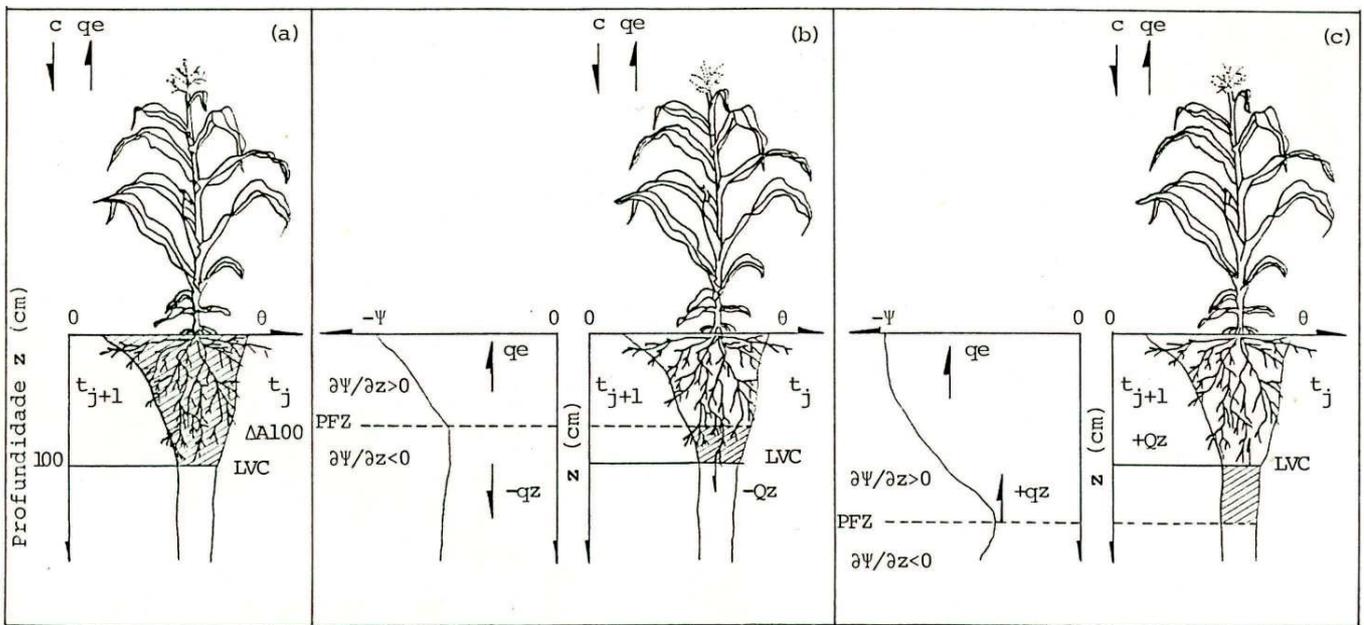


FIGURA 1 - Esquema de Determinação da Variação do Armazenamento (a), da Drenagem Profunda (b) e da Ascensão Capilar (c), no Volume do Controle Considerado (LVC).

total ($\partial\Psi/\partial z$) ao longo do perfil do solo, durante o intervalo de tempo $t_{j+1} - t_j$, zonas de $\partial\Psi/\partial z > 0$ e $\partial\Psi/\partial z < 0$ foram estabelecidas. A transição entre essas duas zonas é um plano de fluxo zero (PFZ), onde $\partial\Psi/\partial z = 0$. As lâminas de drenagem ($-Qz$), ocorridas num intervalo de tempo qualquer $t_{j+1} - t_j$, foram obtidas pela integração dos perfis de umidade, de acordo com o membro da direita na equação 1, fazendo z_1 igual a profundidade de PFZ e $z_2 = 100$ cm. Da mesma forma, quando a profundidade do PFZ era maior que o limite inferior do volume de controle, a integração dos perfis de umidade no intervalo de tempo $t_{j+1} - t_j$, entre $z_1 = 100$ cm e z_2 igual a profundidade do PFZ, possibilitou a obtenção das lâminas de ascensão capilar ($+Qz$). As Figuras 1-b e 1-c exemplificam o cálculo das lâminas de drenagem profunda e de ascensão capilar.

3.7.4. *Evapotranspiração da Cultura*

A lâmina de evapotranspiração da cultura em cada período foi determinada explicitando Q_e na equação 2, já que os demais componentes desta são conhecidos.

As lâminas totais de evapotranspiração, de drenagem profunda e de ascensão capilar foram divididas pelo número de dias do período, para a obtenção dos fluxos médios diários de cada período estudado. Procedeu-se, posteriormente, uma análise da contribuição de cada componente no balanço hídrico e as variações destes ao longo do ciclo da cultura do milho.

3.8. *Influência do Déficit Hídrico na Evapotranspiração da Cultura*

Por ocasião do florescimento da planta, que é o período considerado mais crítico sob o aspecto de estresse hídrico (19), procedeu-se a suspensão da irrigação da parcela 02. A relação entre o fluxo de evapotranspiração da cultura da parcela 02 (qe_2) e o da parcela 01 (qe_1), obtidos através do balanço de água, foi analisada em função do decréscimo do teor

de umidade do solo, com a finalidade de desenvolver um modelo capaz de corrigir a evapotranspiração máxima da cultura em decorrência do decréscimo da disponibilidade de água.

3.9. *Coefficiente de Cultura*

O fluxo de evapotranspiração da cultura da parcela 01 (qe_1), normalmente irrigada, foi comparado com o de evapotranspiração de referência (ET_0), para determinação do coeficiente de cultura (Kc), nos diversos períodos estudados.

As informações a respeito da planta, especialmente peso de matéria seca e IAF , foram relacionadas com os valores de Kc , possibilitando, dessa forma, associar o Kc às características fenológicas da cultura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização da retenção e das propriedades que caracterizam a transmissão da água no solo são requisitos necessários ao estudo da dinâmica da água no sistema solo-água-planta-atmosfera e por isso serão abordados com detalhes a seguir.

4.1. *Características Físico-Hídricas do Solo*

4.1.1. *Propriedades Físicas*

Os valores da densidade de partículas e global, da porosidade total, da composição granulométrica, da argila natural e da porcentagem de matéria orgânica, de cinco horizontes do solo estudado, encontram-se no Quadro 1.

As porcentagens de argila, de silte, de areia grossa e fina, nos horizontes do perfil do solo, com exceção dos horizontes **Ap** e **A3**, estão dentro dos valores esperados e de acordo com observações feitas por COSTA *et alii* (13), em área contígua e por FERNANDES *et alii* (27), em outros locais sob cerrado. Nos horizontes **Ap** e **A3**, a porcentagem de silte aumentou em detrimento a de argila, provavelmente em decorrência de uma falha na determinação dessas composições granulométricas.

QUADRO 1 - Características Físico-Hídricas e Químicas do Latossolo Vermelho-Escuro Álico, Fase Cerrado. Sete Lagoas, MG, 1986

Horizonte	Profundidade (cm)	Densidade de Partículas (g cm ⁻³)	Densidade Global <u>1/</u> (g cm ⁻³)	Porosidade Total <u>1/</u> (cm ³ cm ⁻³)	Composição Granulométrica				Argila Natural	Matéria Orgânica
					Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila		
					%					
AP	0 - 10	2,56	0,87	0,658	5	3	39	53	8	4,20
A3	10 - 26	2,56	1,08	0,579	5	3	24	68	13	3,40
B1	26 - 49	2,53	0,95	0,623	5	4	18	73	12	3,09
B21	49 - 102	2,55	0,89	0,650	5	4	18	73	6	2,41
B22	102 - 142	2,62	0,85	0,673	5	4	16	75	9	2,28

1/ Média de nove repetições.

Provavelmente, como nesses horizontes o teor de matéria orgânica é maior, favorecendo uma maior agregação do solo, o agente dispersante usado não causou a separação total das partículas de argila, que agrupadas em agregados maiores foram separadas e computadas como silte.

Os valores da densidade das partículas, em todos os horizontes, estão em torno de $2,56 \text{ g cm}^{-3}$, estando coerentes com a composição química e granulométrica do solo. Já a densidade global, com exceção do horizonte **A3**, manteve-se abaixo de $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ e dos valores observados por COSTA *et alii* (13) e FERNANDES *et alii* (27). No horizonte **A3**, que se localiza entre 10 e 26 cm de profundidade, nota-se um valor mais elevado da densidade global e conseqüentemente uma redução da porosidade total. Esse aumento da densidade global no horizonte **A3** deve-se, provavelmente, ao adensamento do solo, decorrente do uso intensivo e prolongado de máquinas e implementos agrícolas que, além de exercerem pressão direta sobre o solo, podem favorecer a translocação de argila oriunda da pulverização do horizonte arável.

A despeito das variações verificadas nas propriedades físicas, trata-se de um solo bastante homogêneo, o que de certa forma facilita o estudo da dinâmica da água em seu interior.

4.1.2. Curva Característica de Retenção de Umidade

No Quadro 1A são apresentados os teores de umidade da curva característica, o volume de macro e microporos para cada horizonte, o teor médio ponderado de umidade para todos os horizontes estudados, além da lâmina de água armazenada no volume de controle e a porcentagem acumulada nesse volume da lâmina de água em equilíbrio com potenciais matriciais de 0 a $-1,500 \text{ MPa}$. A curva de teores médios de umidade, bem como os teores de umidade de cada horizonte, foram plotados em função do potencial matricial na Figura 2.

O teor de umidade em equilíbrio com a faixa de potencial matricial de 0 a $-1,500 \text{ MPa}$ variou de $0,281 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, no

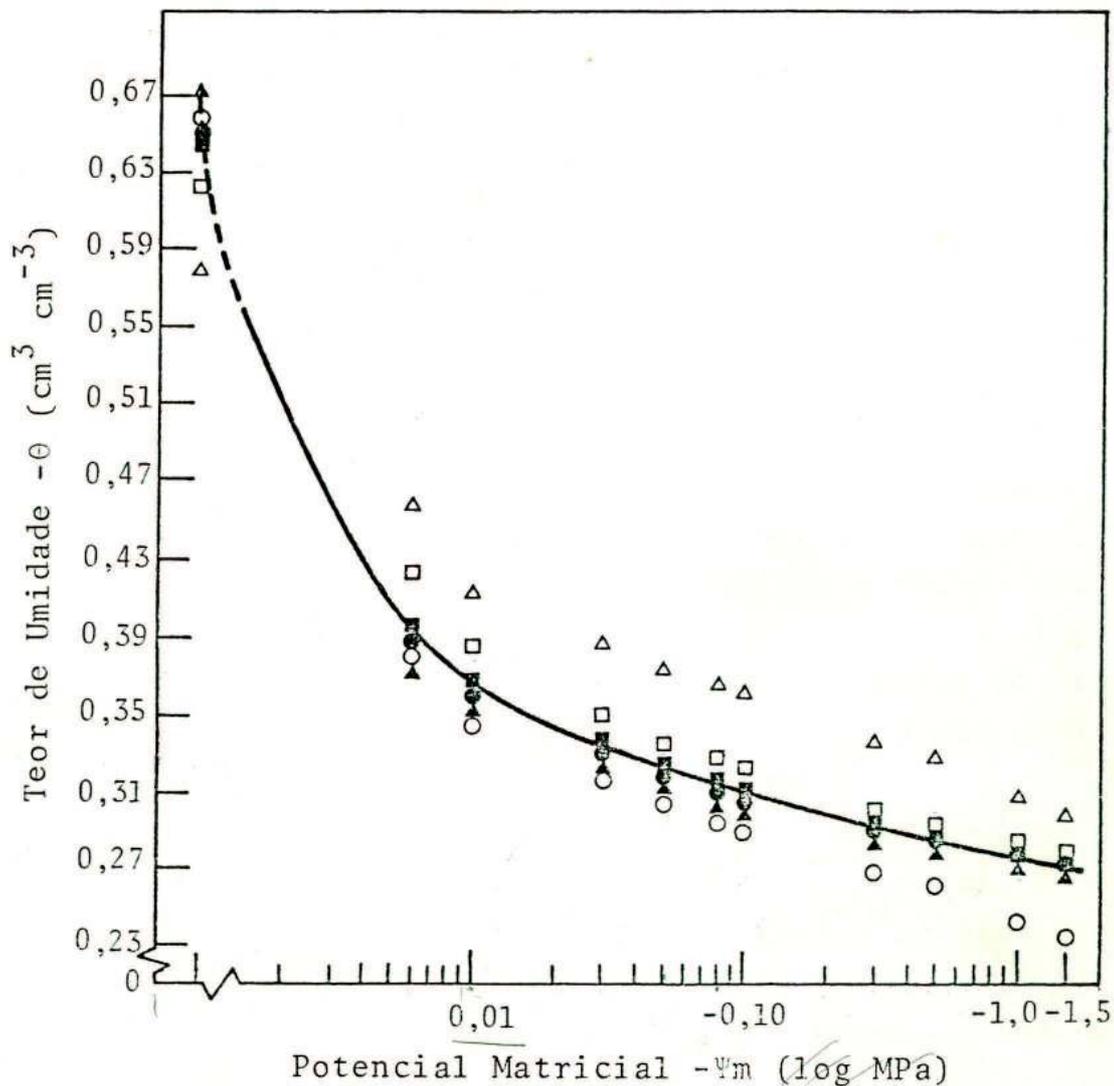


FIGURA 2 - Curva Característica de Retenção de Umidade dos Horizontes Ap (○), A3 (△), B1 (□), B21 (●), B22 (▲) e Média Ponderada de todos os Horizontes (—■—). Sete Lagoas, MG, 1986.



horizonte A3 a $0,424 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, no horizonte Ap. Com exceção do horizonte A3, mais de 58% da água em equilíbrio com essa faixa de potencial está submetida à potenciais maiores que $-0,006 \text{ MPa}$. Se o potencial de $-0,006 \text{ MPa}$ for considerado o limite entre o macro e microporos, evidencia-se a importância dos poros grandes no equilíbrio da água com potenciais elevados, embora o volume de macroporos corresponda sempre a menos da metade do volume total de poros. [Vale ressaltar ainda que nessa faixa de potencial, 70%, ou mais, da água está submetida à potenciais acima de $-0,010 \text{ MPa}$ e cerca de 87% à potenciais acima de $-0,100 \text{ MPa}$, com exceção do horizonte A3. Nos horizontes B21 e B22 mais de 91% da água está submetida à potenciais acima de $-0,100 \text{ MPa}$.

No caso do horizonte A3, o adensamento do solo, além de reduzir o volume total dos poros, favoreceu o equilíbrio da água com potenciais mais baixos como consequência do aumento do volume de microporos em detrimento ao de macroporos (Quadro 1A e Figura 2).

Considerando a lâmina de água armazenada no volume de controle (camada de 0 a 100 cm) em função dos potenciais matriciais, observou-se que mais de 63% da lâmina de água em equilíbrio com potenciais de 0 a $-1,500 \text{ MPa}$ está submetida à potenciais acima de $-0,006 \text{ MPa}$ e, 72% e 88% à potenciais maiores que $-0,010$ e $-0,100 \text{ MPa}$, respectivamente.

4.1.3. *Limites Superior e Inferior de Água Disponível*

A depleção de água no solo, previamente saturado e coberto com lona plástica para prevenir a evaporação, foi avaliada em função do tempo, com a finalidade de determinar o limite superior de água disponível (Capacidade de Campo), no campo (Figura 3). Como a superfície do solo estava coberta, o decréscimo da lâmina armazenada no volume de controle foi considerada apenas drenagem profunda. (Observa-se que a drenagem é muito elevada logo após a saturação, visto que o armazenamento caiu para um valor muito abaixo do correspondente

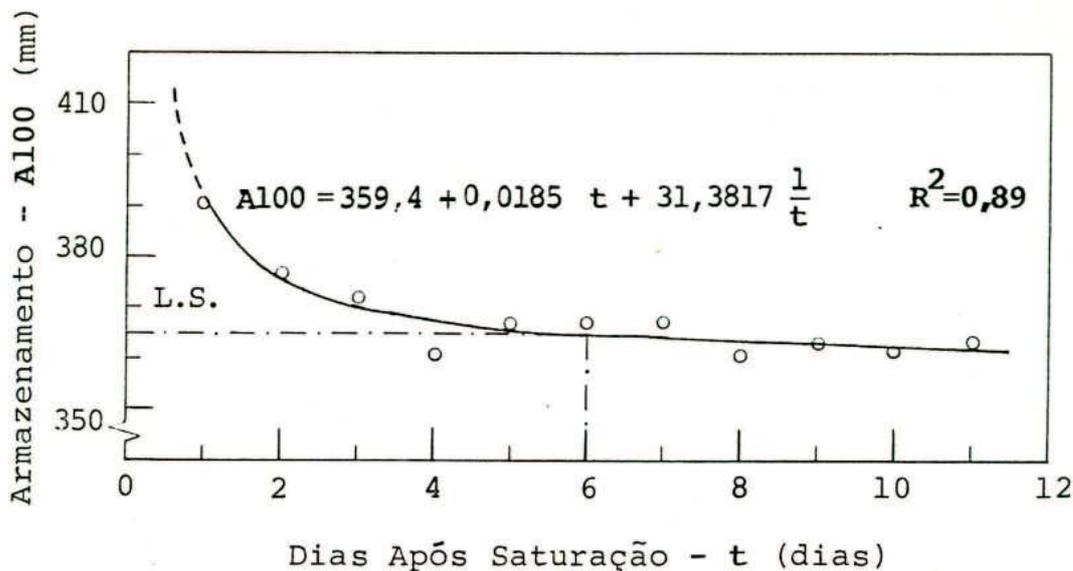


FIGURA 3 - Depleção de Água no Solo Medida (\circ) e Estimada (—) em uma Bacia Coberta com Lona Plástica. Sete Lagoas, MG, 1986.

a porosidade total logo no primeiro dia após a saturação. Isso confirma a forma da curva de retenção de umidade, na qual a maior parte da água em equilíbrio com a faixa de potencial de 0 e -1,500 MPa, está submetida à potenciais matriciais acima de -0,010 MPa, portanto, facilmente removida pela ação da gravidade (13).

O limite superior de água disponível foi atingido aos seis dias após a saturação, considerando como desprezíveis os fluxos de drenagem, estimado pela equação, iguais ou inferiores a $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$ (61). Nesse momento, o armazenamento de água no volume de controle (A100) era 367 mm e o valor estimado pela equação era 365 mm, menos de 1% menor que o valor medido.

A lâmina de água (A100) submetida à -0,010 MPa é de 372 mm, apenas 1,4% maior que o valor medido no campo, ao passo que a lâmina submetida à -0,03 MPa é de 342 mm, 6,8% menor que o valor obtido no campo. Assim, a lâmina de água submetida à -0,010 MPa representa melhor o limite superior de água disponível, conforme observaram COSTA *et alii* (13), ao passo que FERNANDES *et alii* (27) obtiveram valores menores ao pesquisarem um Latossolo com características físicas semelhantes.

Os perfis de umidade do solo, correspondente ao limite superior de água disponível, medido e estimado no campo, e relacionados ao potencial matricial de $-0,010$ MPa, estão plotados na Figura 4. Observa-se que, exceto na camada de 0 a 10 cm do perfil do solo, a forma dos perfis é idêntica, confirmando a eficiência de ambos os métodos na determinação do limite superior de água disponível. Entretanto, para efeito do cálculo da água disponível foi adotado o valor medido no campo, de 367 mm, como o correspondente ao limite superior, por ter sido determinado nas condições em que se desenvolveu o ensaio.

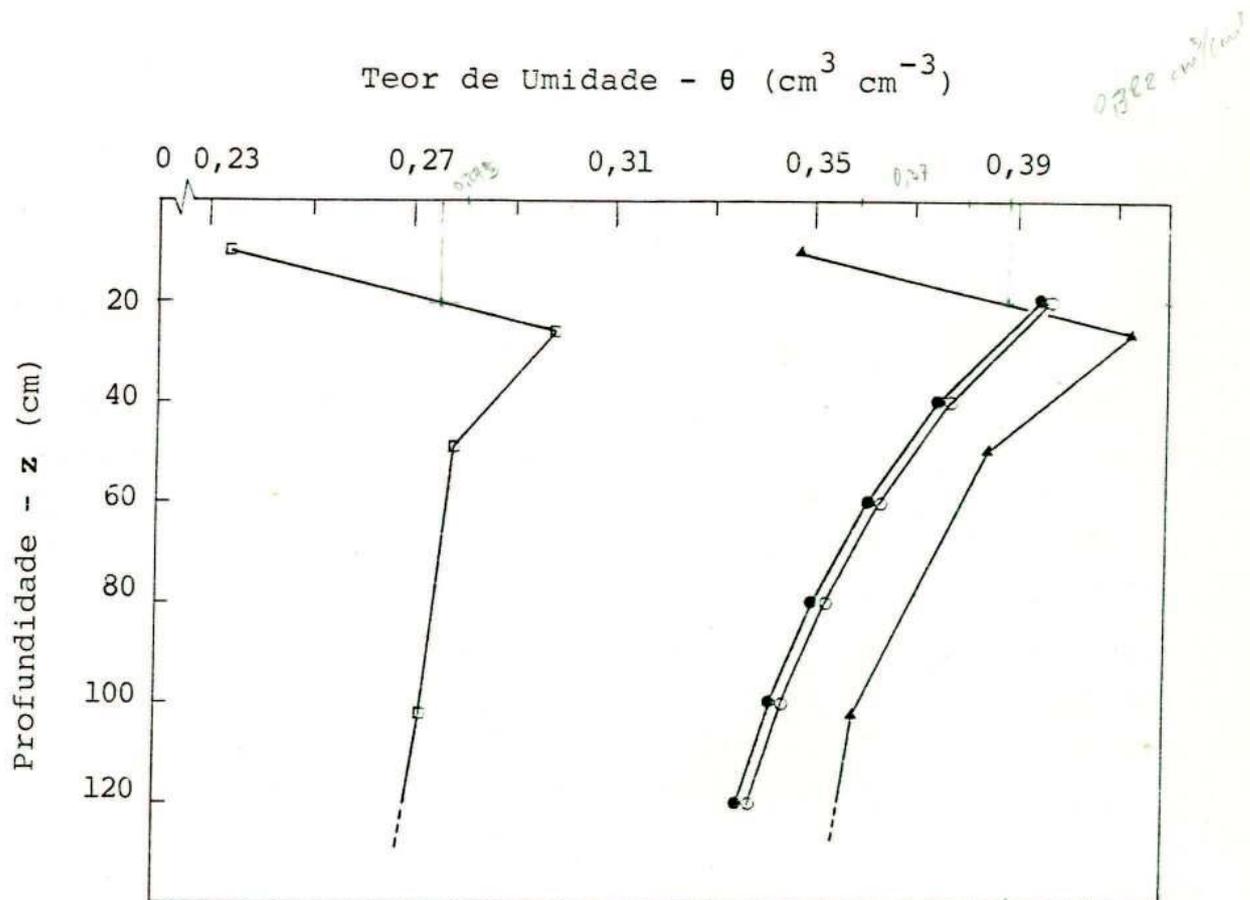


FIGURA 4 - Perfis de Umidade do Solo no Limite Superior de Água Disponível Determinado no Campo (—○—) e Estimado pela Equação Ajustada (—●—), e Perfis de Umidade Submetida à $-0,010$ MPa (—▲—) e à $-1,500$ MPa (—□—). Sete Lagoas, MG, 1986.

O limite inferior de água disponível (Ponto de Murcha Permanente) foi considerado igual a lâmina de água **A100** retida sob um potencial matricial de $-1,500$ MPa, cujo valor obtido foi de 274 mm (Quadro 1A). Um valor praticamente idêntico foi encontrado por COSTA *et alii* (13), a partir de amostras não deformadas, embora FERNANDES *et alii* (27) tenham constatado valor inferior para um Latossolo semelhante fisicamente.

Por outro lado, FERNANDES *et alii* (27) verificaram que o valor do ponto de murcha permanente para o milho, obtido pelo método fisiológico para o mesmo solo referido anteriormente, aproximou-se mais do teor de umidade retido à $-0,500$ MPa do que a $-1,500$ MPa. Entretanto, a diferença entre os teores de umidade retidos à $-0,500$ e $-1,500$ MPa não ultrapassou a 3%, o que é certamente inferior a magnitude da variabilidade espacial dos solos (28) e desprezível em termos de água disponível para as plantas.

4.1.4. Água Disponível

Definidos os limites superior e inferior em termos de armazenamento de água no volume de controle, determinou-se a lâmina de água disponível do solo para as plantas, que foi de 93 mm ou em termos de teor de umidade média no perfil, de $0,093 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Essa lâmina de água disponível é muito pequena, sendo uma característica da maioria dos solos sob cerrado, o que torna as plantas nele cultivadas, cujo sistema radicular desenvolve pouco, muito vulneráveis à déficits hídricos prolongados, como afirma ESPINOZA (25).

Se a água submetida à $-0,010$ MPa for considerada como limite superior, o que não acarretaria muitos erros, pois é muito próximo ao valor obtido, nota-se que a quantidade de água disponível por horizonte variou de $0,087 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, no horizonte B21, a $0,115 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, no horizonte A3. Com exceção do horizonte A3, mais de 50% de água disponível está submetida a potenciais maiores que $-0,100$ MPa, como também observaram

COSTA *et alii* (13). No horizonte **A3**, embora a quantidade total de água disponível tenha sido ligeiramente maior, o adensamento favoreceu a retenção de água a potenciais mais baixos.

Quando se analisou a lâmina de água disponível no volume de controle, verificou-se que apenas 27% da lâmina de água em equilíbrio com potenciais matriciais entre 0 e -1,500 MPa está disponível às plantas e que da lâmina disponível, mais de 56% está submetida a potenciais maiores que -0,100 MPa, estando coerente com as propriedades físicas do solo (Quadro 1) e com as características de transmissão de água, verificadas por COSTA *et alii* (13) e ESPINOZA (25).

4.2. Balanço de Água no Solo

Nos Quadros 1B e 2B são apresentados os teores de umidade do solo em volume e os potenciais totais de água no solo, no período de 42 a 115 DAP.

Os potenciais totais de água no solo, estimados com blocos de resistência elétrica, estão bastante coerentes, como pode ser observado no Quadro 2B, demonstrando a boa resposta dos blocos ao secamento e umedecimento do solo.

Assim como REICHARDT (52) e REICHARDT *et alii* (53), observou-se que o plano de fluxo zero (PFZ) varia com o perfil de umidade do solo. Nos dias chuvosos, a tendência do fluxo vertical é ser descendente, com o PFZ, após cessar a chuva, localizado na superfície. À medida que o solo seca, devido a evapotranspiração, o PFZ caminha para baixo. Entretanto, se uma nova chuva ou irrigação é aplicada, o potencial total na superfície aumenta, criando um novo PFZ. Essa dificuldade foi superada, considerando sempre o PFZ mais baixo, pois, nessa situação, ele representa a profundidade máxima de extração de água pela planta.

A posição do PFZ (Quadro 2B) variou de 10 a 120 cm, abaixo da superfície do solo, na parcela 01 e de 10 a 160 cm na parcela 02, comprovando a contribuição das camadas inferiores

do solo no processo de evapotranspiração. Especificamente na parcela 02, que se submeteu a um déficit hídrico a partir do florescimento, a contribuição atingiu até a profundidade de 160 cm. Como a grande maioria do sistema radicular está concentrada nos primeiros 45 cm do perfil do solo (72), a contribuição das camadas inferiores deve ser na forma de fluxos de ascensão capilar. A literatura (38, 53) mostra que o PFZ varia com o solo e com a cultura utilizada; inclusive ESPINOZA (25) observou que 90% da água extraída pelo milho, em solos sob cerrado, é proveniente dos primeiros 60 cm do solo, e REICHARDT *et alii* (56) observaram que a cultura do milho, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, fase arenosa, extrai água até a 127 cm de profundidade.

Nos períodos chuvosos ou imediatamente após irrigação, em que ocorreram variações positivas do armazenamento como tempo, não foi possível a estimativa de drenagem profunda, constituindo-se uma limitação da metodologia usada, com o agravante de que nestes períodos é que se processam os maiores fluxos de drenagem. Estas limitações, nos períodos chuvosos, foram também constatadas por REICHARDT *et alii* (53) que, por isso, estimaram a drenagem nos períodos chuvosos de outra forma. Entretanto, esses autores acham que a metodologia de separação de fluxos apresenta vantagens em relação a equação de Darcy, na estimativa da drenagem. Já KALMS e IBERNON (38) afirmam que essa técnica é confiável nos períodos de déficit hídrico bem definidos, sendo inaplicável nos períodos chuvosos, pois, ora subestima, ora superestima a drenagem profunda, em decorrência das flutuações do PFZ.

As lâminas diárias de drenagem profunda e de ascensão capilar foram agrupadas em períodos maiores e, juntamente com as lâminas de chuva, de irrigação e de variação do armazenamento, permitiram o cálculo das lâminas de evapotranspiração, mediante o uso da equação 2. Os resultados encontram-se nas Figuras 5-a e 5-b.

O PFZ permaneceu acima do contorno inferior do volume de controle até aos 31 DAP (Quadro 2B), caracterizando um período de ocorrência de drenagem profunda, nas duas parcelas

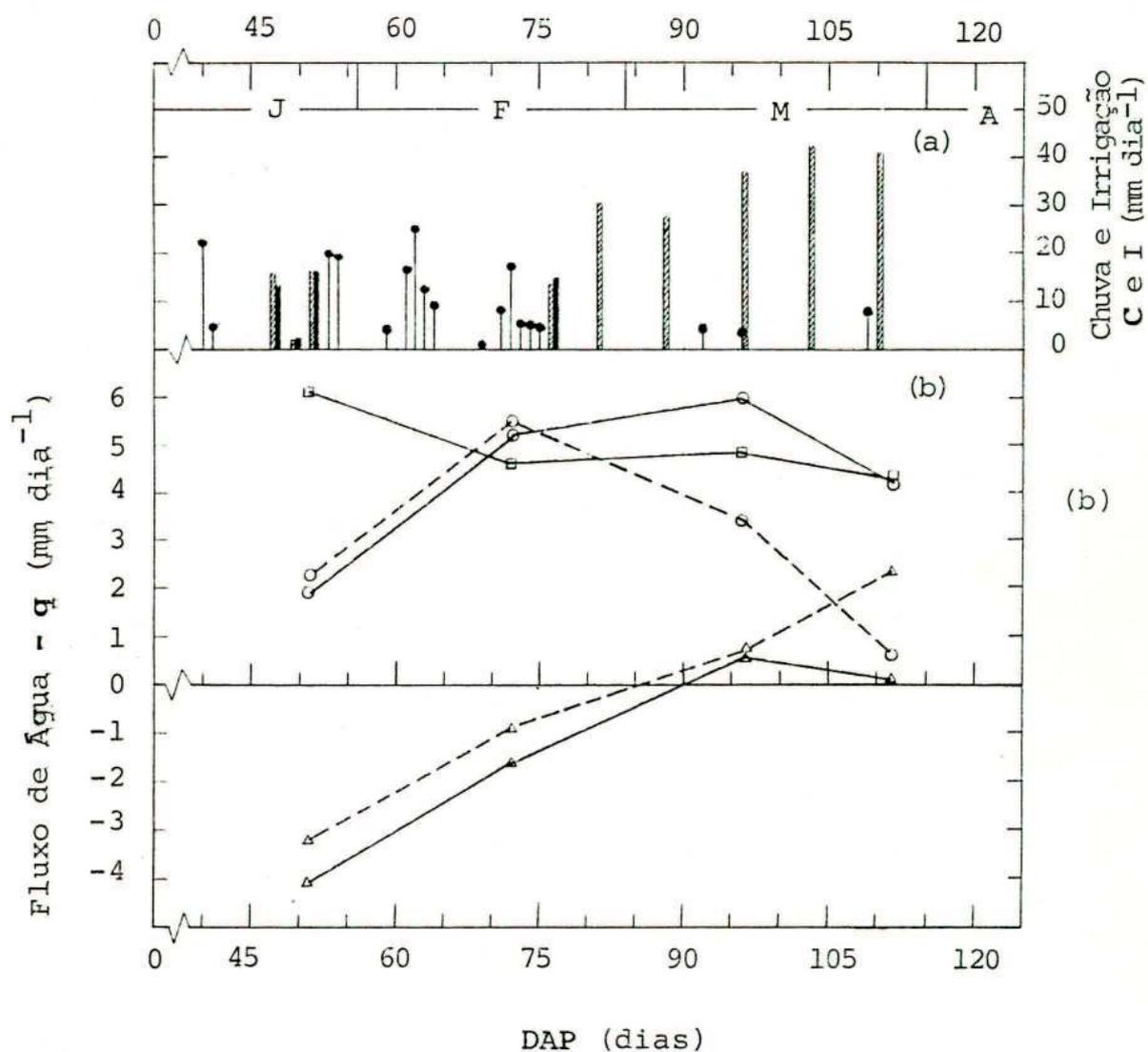


FIGURA 5 - Chuva (●), Irrigação das Parcelas 01 (▨) e 02 (▩), Evapotranspiração de Referência (—□—), Evapotranspiração da Cultura das Parcelas 01 (—○—) e 02 (-○-) e Drenagem Profunda ou Ascensão Capilar das Parcelas 01 (—△—) e 02 (-△-). Sete Lagoas, MG, 1986.

(Figuras 5-b). No período de 42 a 60 DAP, tais perdas representaram 67% e 58% do total das perdas (drenagem e evapotranspiração), nas parcelas 01 e 02, respectivamente. Vários autores, pesquisando arroz (9), feijão (53), café (50) e sorgo (71), constataram perdas por drenagem profunda que variaram de 10% do total das perdas, no cafeeiro em crescimento ativo (50), até 90%, com a cultura do arroz, no início do ciclo e baixa densidade populacional (9). Os fluxos de drenagem profunda atingiram um valor médio de até 4 mm dia^{-1} , nesse período, sendo idêntico ao valor encontrado por VAN BAVEL *et alii* (71), nos primeiros quatro dias após irrigação, numa parcela cultivada com sorgo.

Embora tenham ocorrido chuvas e irrigações pesadas no período de 60 e 84 DAP (Figura 5-a), as perdas por drenagem das parcelas 01 e 02 reduziram para 23% e 14%, respectivamente. Segundo alguns pesquisadores, trabalhando em laboratório (45) e em campo (9, 73), esta redução deve-se ao aumento da extração de água, em decorrência do maior desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea da planta.

As elevadas perdas por drenagem profunda, observadas anteriormente, confirmam a importância desse componente do balanço de água no solo, na estimativa de evapotranspiração e na lixiviação de nutrientes e herbicidas, conforme tem sido mencionado por muitos pesquisadores (9, 12, 15, 38, 44, 45, 50, 52, 53, 56, 64, 71, 73).

A partir dos 82 DAP a posição do PFZ passou para baixo do contorno inferior do volume de controle (Quadro 2B), dando início a um período em que se verificaram fluxos de ascensão capilar, em ambas parcelas (Figura 5-b). Notadamente na parcela 02, no período de 84 a 108 DAP, o fluxo de ascensão capilar contribuiu com 22% da evapotranspiração e no período de 108 a 115 DAP, não só contribuiu para o fluxo de evapotranspiração, como também contribuiu para o acréscimo do armazenamento de água no volume de controle. Embora a condutividade hidráulica desse solo caia violentamente com o decréscimo do teor de umidade (13), os gradientes de potencial total, desenvolvidos entre as diversas camadas do solo

(Quadro 2B), foram suficientes para manter fluxos ascendentes relativamente elevados na parcela 02. Valores de até $2,4 \text{ mm dia}^{-1}$ foram detectados após o longo período hídrico subsequente ao período chuvoso de dezembro, janeiro e fevereiro (Figura 5-a). Fluxos de ascensão capilar atingiram 6 mm dia^{-1} , com a cultura do sorgo (71) e 2 mm dia^{-1} , com a grama (64), em experimentos no campo, entretanto, no solo sob cerrado, cultivado com milho, ESPINOZA (25) verificou fluxos de no máximo $0,63 \text{ mm dia}^{-1}$, considerados desprezíveis. A contribuição desses fluxos não deve ser desprezada em balanços hídricos, visando a estimativa da evapotranspiração (60, 64, 71), e mesmo na determinação do limite inferior de água disponível no campo.

O fluxo médio de evapotranspiração de referência (ET₀), estimado pela equação de PENMAN (49), variou de aproximadamente $6,0 \text{ mm dia}^{-1}$, em janeiro, até em torno de $4,5 \text{ mm dia}^{-1}$, nos meses seguintes (Figura 5-b e Quadro 1D).

Os fluxos de evapotranspiração da cultura, nas parcelas 01 e 02, foram praticamente iguais até por ocasião do florescimento da cultura, que ocorreu por volta dos 75 DAP (Figura 5-b). Nesse período, os tratamentos de irrigação nas duas parcelas eram iguais e a pequena diferença verificada no fluxo de evapotranspiração deve-se a diferenças no fluxo de drenagem e no armazenamento de água no solo. Como estes dois componentes foram obtidos a partir de dados de umidade, possivelmente essas diferenças devem-se a variabilidade espacial do solo, no que se refere às suas propriedades físicas (33, 44, 48, 56, 69, 70). Mesmo nos solos considerados homogêneos (56) e com a utilização de hidrossonda de neutrons para estimativa da umidade (70) foi constatada certa variabilidade nas características de transmissão de água, com implicações no balanço hídrico do solo.

Na parcela 01, normalmente irrigada, o fluxo de evapotranspiração da cultura estava em torno de $2,0 \text{ mm dia}^{-1}$, por volta dos 50 DAP, aumentando para $5,2 \text{ mm dia}^{-1}$, aos 72 DAP, atingindo um valor máximo de $6,0 \text{ mm dia}^{-1}$, aos 96 DAP e decrescendo em seguida, para $4,2 \text{ mm dia}^{-1}$, aos 111 DAP (Figura

5-b). O aumento do fluxo de evapotranspiração da cultura sem limitação de água ao longo do seu ciclo, com posterior decréscimo no início do período de senescência, está relacionado principalmente ao desenvolvimento da parte aérea, especificamente com o índice de área foliar (IAF) (19, 60). Um valor máximo de fluxo de evapotranspiração de $6,5 \text{ mm dia}^{-1}$ foi verificado por ESPINOZA (26) aos 58-68 DAP, com a cultivar Cargill 111, plantada no período das secas, no solo de cerrado da região Centro-Oeste. ESPINOZA (24) verificou também valores máximos de $6,84$ a $5,57 \text{ mm dia}^{-1}$ para populações, respectivamente, 60 e 40 mil plantas ha^{-1} , aos 80-90 dias após emergência, com a cultivar C-111 X, plantada no período das secas.

Na Figura 6 pode-se constatar o aumento do peso de matéria seca das folhas e da parte aérea, com conseqüente aumento do IAF, a partir dos 45 DAP. A partir dos 75 DAP, a cultura atingiu seu pico de desenvolvimento vegetativo, praticamente não se verificando aumento no peso de matéria seca das folhas, o que coincide com o pico do fluxo de evapotranspiração. Por outro lado, aos 110-120 DAP nota-se que, na parcela 01 ocorreu um ligeiro decréscimo no peso de matéria seca das folhas, como resultado do início do período de senescência da planta, refletindo também na redução do fluxo de evapotranspiração (Figura 5-b).

Na parcela 02, cuja irrigação foi suspensa aos 76 DAP, notou-se que, embora o fluxo de evapotranspiração de referência tenha permanecido constante, a planta experimentou uma redução rápida no seu fluxo de evapotranspiração, como conseqüência do decréscimo da disponibilidade de água (Figuras 5-a e 5-b). Nessa fase de decréscimo o fluxo de evapotranspiração da cultura torna-se praticamente independente da demanda de evapotranspiração (8, 68) e aparentemente dependente da densidade de raiz, das características fisiológicas da cultura (36) e físico-hídricas do solo (26, 28, 58). Segundo ESPINOZA (26), a grande susceptibilidade do milho à déficits hídricos, por períodos maiores que 12 dias, deve-se a grande concentração de raízes (60-80%) nos primeiros 40 cm do perfil

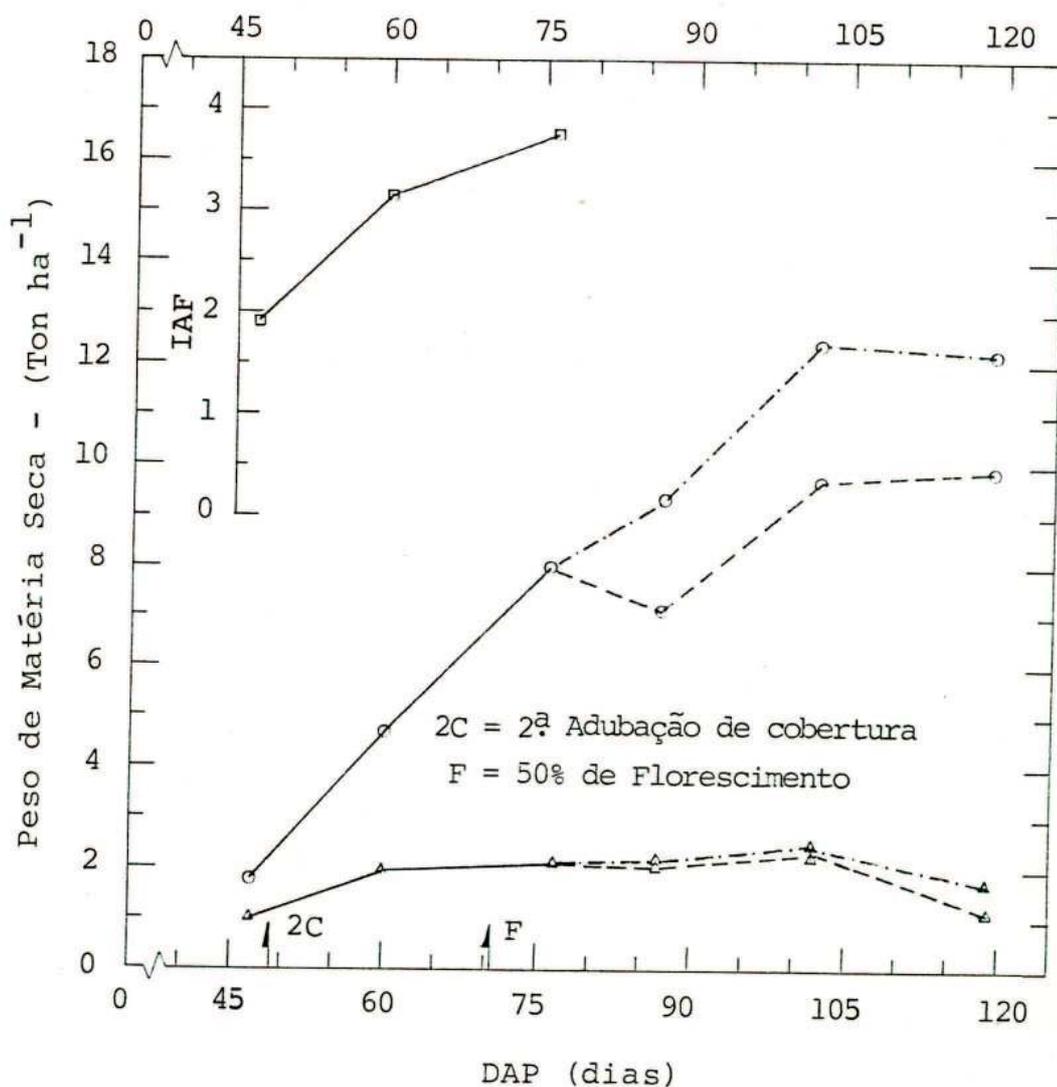


FIGURA 6 - Peso de Matéria Seca da Parte Aérea (—○—), das Folhas (—△—) e IAF (—□—) até aos 76 DAP e Peso de Matéria Seca da Parte Aérea (○) e das Folhas (△), das Parcelas 01 (—·—·) e 02 (---). Sete Lagoas, MG, 1986.

do solo. VASCONCELLOS *et alii* (72) verificaram que, nas condições do presente trabalho, a grande maioria do sistema radicular do milho está concentrada nos primeiros 30 cm do perfil do solo, o que pode também ter contribuído para a redução rápida do fluxo de evapotranspiração da cultura, na parcela 02, após a suspensão da irrigação.

O fluxo de evapotranspiração da cultura, na parcela 02, passou de um valor máximo de 5,49 mm dia⁻¹, aos 72 DAP, para praticamente zero, por volta dos 112 DAP, causando uma redução no rendimento de grãos de 25%, em relação a parcela 01, embora durante esse período tenham ocorrido chuvas leves

e fluxos de ascensão capilar que podem ter reduzido o efeito do estresse hídrico prolongado. DENMEAD e SHAW (17) constataram a redução na assimilação de nutrientes pela planta de milho em decorrência do estresse hídrico, e tanto maior a redução quanto mais longo for o período de estresse. Uma redução de 39% no rendimento da cultivar Cargill 111, plantada em solo de cerrado, foi verificada por ESPINOZA (26), como consequência de déficit hídrico induzido no período das secas.

4.3. *Evapotranspiração da Cultura em Função do Déficit de Água no Solo*

As variações do armazenamento (A_{100}) e da disponibilidade de água para as plantas (AD_{100}) no volume de controle foram plotadas em função do número de dias após o plantio (DAP), na Figura 7-a. Como limites superior e inferior de água disponível foram adotados os valores discutidos no item 4.1.3..

Pela Figura 7-a, nota-se que, até antes da suspensão da irrigação da parcela 02, o armazenamento de água no volume de controle permaneceu acima de 50% da água disponível, nas duas parcelas, exceto por volta dos 45-50 DAP, em que se verificou uma queda marcante do armazenamento. Como nesse período ocorreram irrigações regulares nas duas parcelas (Figura 5-a), pode-se deduzir que essa queda no armazenamento deveu-se a uma falha na hidrossonda de neutrons, usada para estimar o teor de umidade do solo.

Os valores da relação entre a evapotranspiração da cultura das parcelas 01 e 02 (qe_2/qe_1) foram plotados em função do número de DAP (Figura 7-b).

Observa-se que a equação de regressão $qe_2/qe_1 = 4,0 - 0,0355 \text{ DAP}$ apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,96 e possibilitou a determinação do início e final da fase de decréscimo de qe_2/qe_1 , que ocorreram aos 85,6 e 113,8 DAP, respectivamente.

A relação qe_2/qe_1 permaneceu em torno da unidade, ou seja, o fluxo de evapotranspiração da cultura permaneceu no

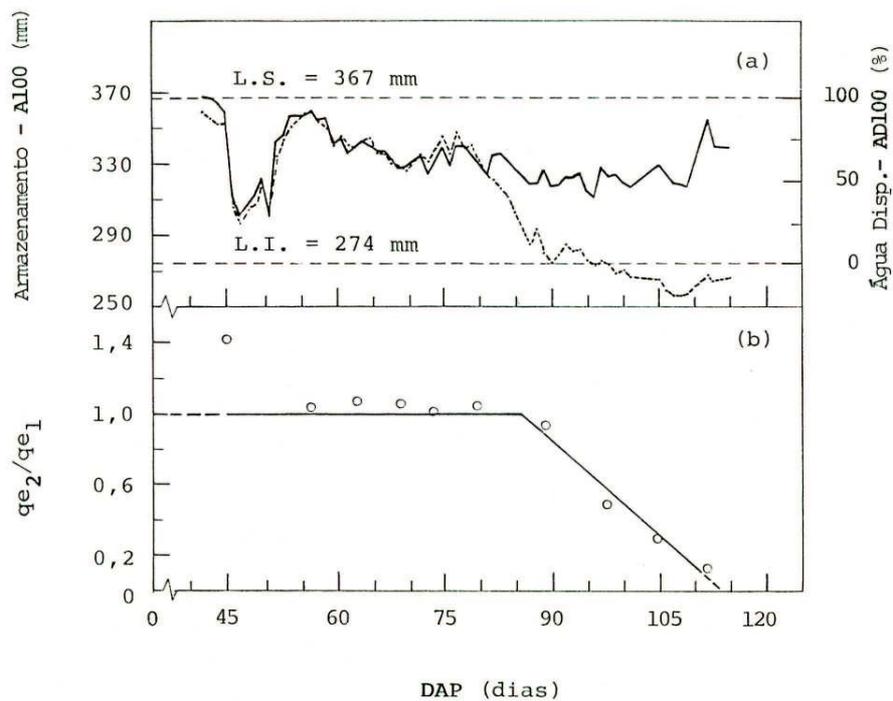


FIGURA 7 - Valores Experimentais (O) e Estimados (—) da Relação q_{e2}/q_{e1} em Função do Número de Dias Após o Plantio, do Armazenamento, e da Água Disponível nas Parcelas 01 (—) e 02 (- - -). Sete Lagoas, MG, 1986.

seu valor máximo, até aos 85,6 DAP, no momento em que os efeitos das características físico-hídricas do solo tornaram-se mais limitantes que a demanda climática, causando o início do decréscimo no fluxo de evapotranspiração da cultura (2, 17, 26, 28, 58, 60). O início da fase de decréscimo ocorreu aproximadamente 10 dias após a última irrigação realizada aos 76 DAP (Figura 7-b), refletindo a grande susceptibilidade do milho cultivado nesse solo, ao déficit hídrico, embora ESPINOZA (26) tenha constatado que reduções drásticas na evapotranspiração só ocorram 12 a 15 dias após a suspensão da irrigação.

Ao início da fase de decréscimo TANNER (68) denominou "ponto crítico", a partir do qual a relação qe_2/qe_1 decresceu de forma linear com o tempo, zerando no final da referida fase (Figura 7-b). Pela Figura 7-a, observa-se que o decréscimo da água disponível (AD100) é aproximadamente linear com o tempo e, como a relação qe_2/qe_1 também o é, seguramente existe uma relação linear entre qe_2/qe_1 e AD100.

O final da fase de decréscimo do fluxo de evapotranspiração da cultura foi determinado prolongando-se a curva de decréscimo até que a relação qe_2/qe_1 se anulasse, o que ocorreu aos 113,8 DAP, isto é, 38 dias após a última irrigação (Figura 7-b). Embora tenham ocorrido chuvas leves e mesmo ascensão capilar durante a fase de decréscimo (Figuras 5-a e 5-b), elas não foram suficientes para suprir a demanda de evapotranspiração, o que permite considerar o final da referida fase como sendo o limite inferior de água disponível, conforme discute RITCHIE (61). Todavia, o menor valor de armazenamento, observado no período, foi de 256 mm, ocorrido aos 108 DAP, antes da última chuva (Figura 7-a), o que é mais próximo de um limite de água disponível determinado em condições de campo.

Pela Figura 7-a, observa-se que o armazenamento no volume de controle, correspondente ao limite inferior, está abaixo do valor da lâmina d'água retida a -1,500 MPa, também considerado por vários autores (31, 47, 51) como sendo o ponto de murcha permanente. Considerando que o valor do ponto de murcha permanente esteja correto, já que COSTA *et alii* (13)

também verificaram valores idênticos para o mesmo solo, pode-se levantar a hipótese de que a planta extraiu água abaixo de $-1,500$ MPa, como já foi observado, embora em outras condições, com as culturas de soja (20) e de sorgo (70). Entretanto, isto não ficou comprovado dada a limitação do bloco de resistência elétrica, revestido com gesso, em permitir a estimativa de potenciais matriciais de água no solo, abaixo de $-1,500$ MPa (Figura 8).

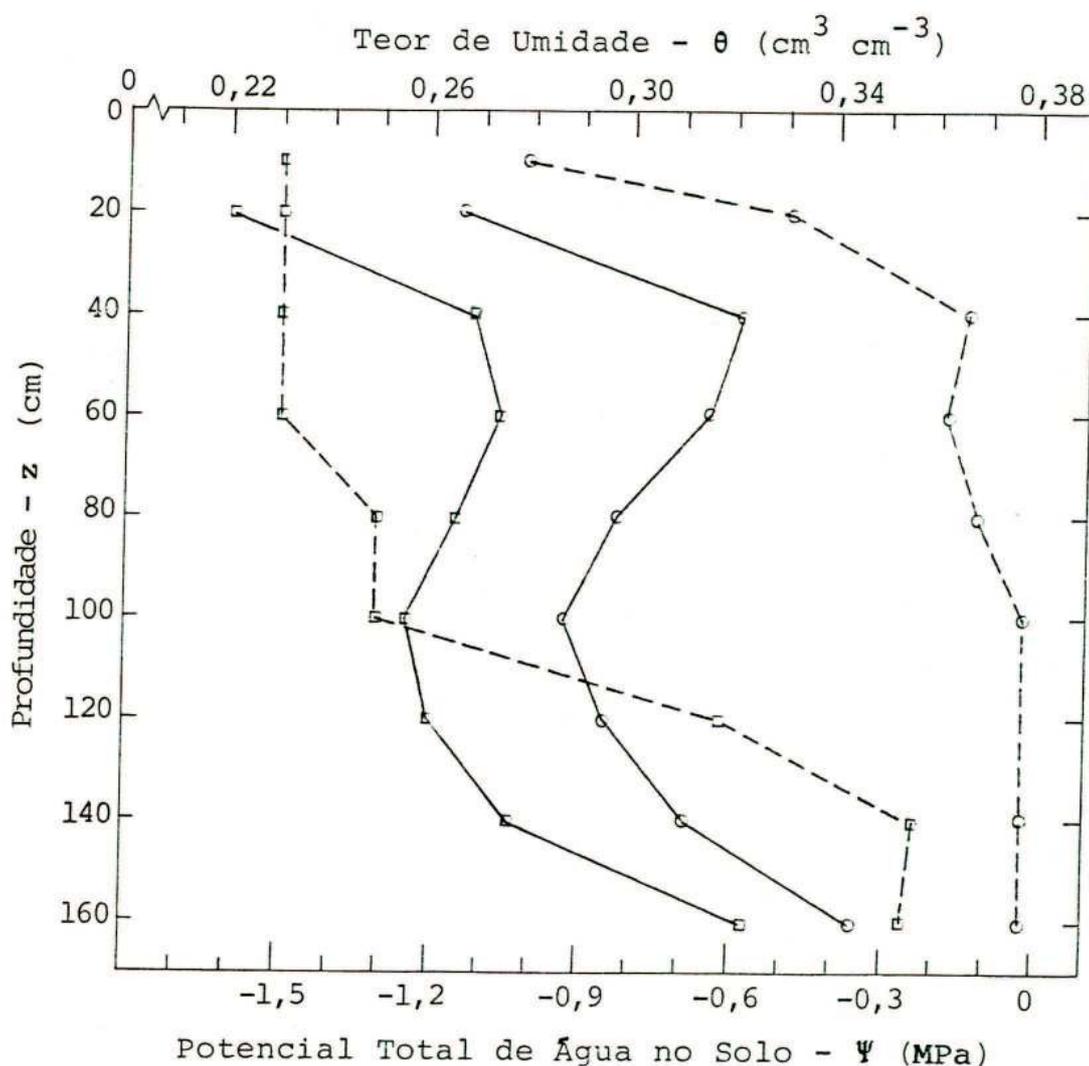


FIGURA 8 - Perfis de Umidade (—) e de Potencial Total de Água no Solo (---), do Início (O) e Final (□) da Fase de Decréscimo da Relação qe_2/qe_1 . Sete Lagoas, MG, 1986.

Uma segunda hipótese seria um erro na curva de calibração da hidrossonda de neutrons, causando uma subestimativa sistemática dos teores de umidade e conseqüentemente do armazenamento de água no solo. Esta hipótese parece ter mais procedência e foi aceita como correta, pois o armazenamento de água no volume de controle esteve sempre abaixo do valor correspondente ao limite superior de água disponível, mesmo após chuvas ou irrigações pesadas (Figuras 5 e 7-a). Assim, o armazenamento correspondente ao limite inferior, determinado no campo, que é de 256 mm, foi aumentado para 274 mm correspondente à lâmina retida à -1,500 MPa, não alterando dessa forma a lâmina de água disponível. As curvas de armazenamento (A100) da Figura 7-a, ficaram deslocadas de 18 mm para cima, sem prejuízo do balanço de água no solo pois os componentes deste foram obtidos pela variação temporal do armazenamento, onde o erro é eliminado.

Os perfis de umidade e de potencial total de água no solo, do início e do final da fase de decréscimo do fluxo de evapotranspiração da cultura, são apresentados na Figura 8. Os perfis do início da fase foram obtidos por interpolação entre os dias 85 e 87 DAP e os do final da fase foram considerados os de 108 DAP, por serem mais representativos do limite inferior de água disponível, conforme já foi discutido. Tanto os perfis de umidade, quanto os de potencial total, apresentam variações acentuadas dos seus valores com a profundidade, dificultando, dessa forma, a representatividade destes com um único valor, como também observou RITCHIE (60). Entretanto, para efeito de comparação com trabalhos citados na literatura, foram usados valores de armazenamento de água ou valores médios de potencial total e de umidade, no volume de controle.

No início da fase de decréscimo do fluxo de evapotranspiração da cultura, o armazenamento de água no solo era de 297 mm, que após correção (somando-se 18 mm), tornou-se 315 mm. Esse valor corresponde a um teor médio de umidade de $0,315 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e representa 44% da água disponível no volume de controle (Figuras 7-a e 7-b). O fluxo de evapotranspiração

de referência, por ocasião do início do decréscimo, estava em torno de $5,30 \text{ mm dia}^{-1}$ (Quadro 1D).

O valor do ponto crítico de 44% da água disponível é bastante inferior ao encontrado por DENMEAD e SHAW (17) para o milho, que é de 80% da água disponível, sob uma demanda de evapotranspiração de $5,6 \text{ mm dia}^{-1}$. Por outro lado, RITCHIE (60) trabalhando também com milho, observou que o ponto crítico só é atingido quando o teor de umidade do solo corresponde a 25% da água extraível (água extraída pela planta desde a última chuva ou irrigação até que a transpiração seja nula), sob uma demanda de aproximadamente $6,0 \text{ mm dia}^{-1}$. Valores do ponto crítico para diversas culturas e condições edafoclimáticas foram relacionados por TANNER (68), constatando que a maioria deles estão na faixa de 25 a 35% da água extraível, portanto, inferiores ao valor encontrado no presente trabalho.

Provavelmente, essas diferenças nos valores do ponto crítico para uma mesma planta, sob condições semelhantes de demanda de evapotranspiração, devem-se ao desenvolvimento diferenciado do sistema radicular das plantas, que explorando volumes diferentes de solo, comportam-se também de forma distinta quando submetidas ao estresse hídrico, conforme também observaram RITCHIE *et alii* (58) e RITCHIE (60).

Definidos o início (ponto crítico), o final (limite inferior de água disponível) e a forma de decréscimo da relação qe_2/qe_1 , estabeleceu-se uma função que possibilita a determinação do fluxo de evapotranspiração real da cultura (E_{Tr}), a partir do fluxo de evapotranspiração máxima da mesma (E_{Tmax}) e da disponibilidade de água, baseado no modelo desenvolvido por TANNER (68) (Figura 9). Conhecendo-se também o coeficiente de cultura (K_c) para o estágio em que se processou o estudo, o fluxo de evapotranspiração real do milho pode ser obtido a partir do fluxo de evapotranspiração de referência (E_{To}) da mesma época, por intermédio da seguinte equação:

$$E_{Tr} = (1 - \frac{1}{44} AD100) K_c E_{To} \quad \text{eq. 3}$$

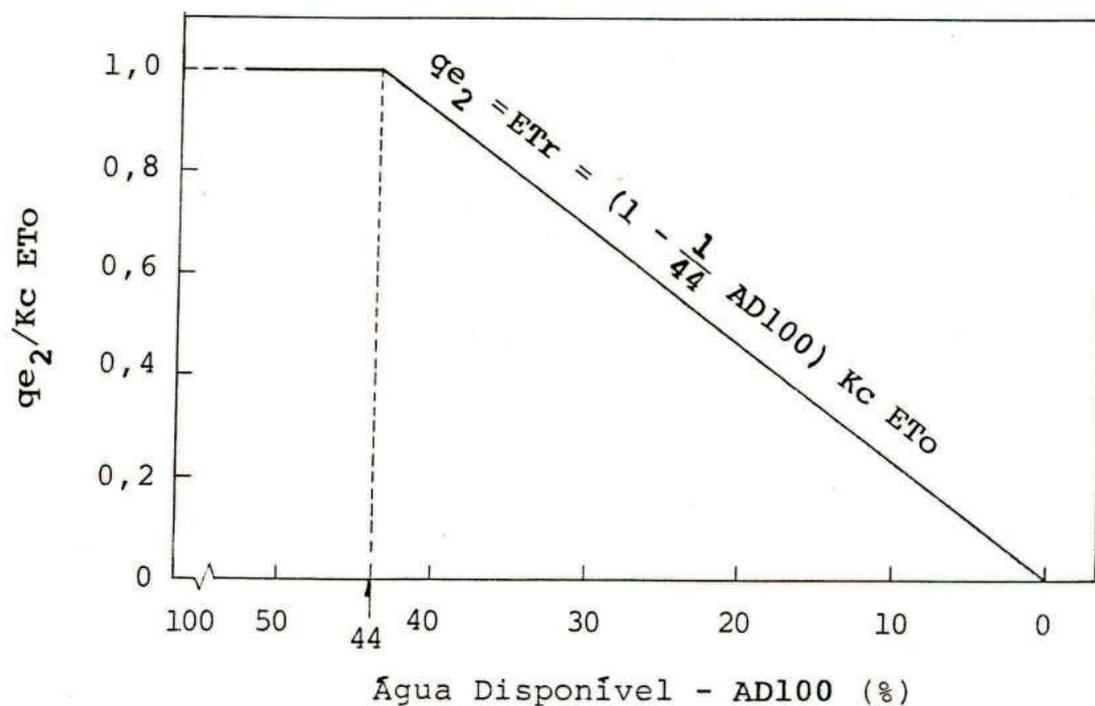


FIGURA 9 - Evapotranspiração Real (ETr) em Função da Evapotranspiração de Referência (ETo), do Coeficiente de Cultura (Kc) e da Disponibilidade de Água (AD100). Sete Lagoas, MG, 1986.

em que:

- ETr - fluxo de evapotranspiração real (mm dia^{-1});
- AD100 - água disponível no volume de controle (%);
- Kc - coeficiente de cultura e
- ETo - fluxo de evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

Vale ressaltar que esta equação só é válida para o período estudado, ou seja, após o florescimento da cultura. Para estádios anteriores o comportamento da planta ante ao estresse hídrico seguramente será diferente.

4.4. Coeficiente de Cultura (Kc)

Os fluxos médios de evapotranspiração da cultura na parcela, normalmente irrigada, bem como os fluxos médios de

evapotranspiração de referência, estimados pela equação de PENMAN (49) e os valores do coeficiente de cultura (Kc) para os diversos estádios de crescimento da planta, são apresentados no Quadro 1C. Os valores do Kc foram plotados na Figura 10, em função do número de dias após o plantio (DAP).

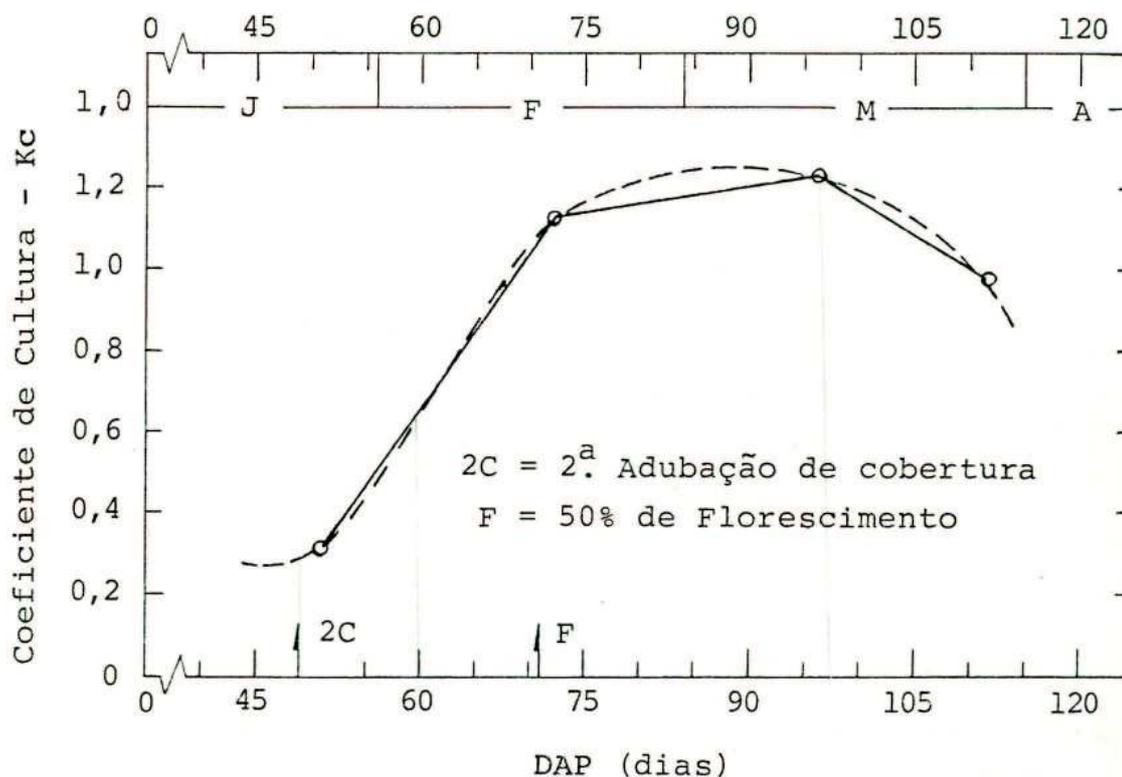


FIGURA 10 - Coeficiente de Cultura em Função do Número de Dias Após o Plantio. Sete Lagoas, MG, 1986.

O valor médio do coeficiente de cultura foi de 0,32 no período de 42 a 60 DAP, aumentando bruscamente para 1,13 no período de 60 a 84 DAP, atingindo o máximo de 1,23 no período de 84 a 108 DAP e decrescendo para 0,98 no período de 108

a 115 DAP. No período de 42 a 60 DAP, o valor de K_c está abaixo do esperado, que seria mais próximo de 1,0, pois, nesse período a planta encontra-se em franco crescimento, com o IAF ultrapassando a 3,0 aos 60 DAP (Figura 6). A evapotranspiração do milho atinge o valor máximo, quando a planta encontra-se em cobertura total (19, 60, 67), o que ocorre quando o IAF alcança valores entre 2,0 e 3,0 (60, 67). Em trabalhos conduzidos no período das secas, no cerrado (24, 26) e no verão, no sul do Brasil (43), foram encontrados, no mesmo estágio de crescimento do milho, valores de K_c maiores. Provavelmente a causa deste baixo K_c seja a subestimativa do fluxo de evapotranspiração da cultura, em decorrência da dificuldade de separá-lo do fluxo de drenagem profunda, conforme já foi discutido anteriormente (38, 53).

Nos períodos de 60 a 84 e 84 a 108 DAP, registraram-se aumentos acentuados nos valores de K_c (Figura 10), decorrentes do aumento da área foliar (Figura 6) e conseqüentemente do consumo de água pela planta (Figura 5-b), coincidindo com as observações encontradas na literatura (19, 24, 43).

O valor médio máximo de 1,2 para o K_c ocorreu no período de 84 a 108 DAP, muito próximo aos valores encontrados por ESPINOZA (26), na época das secas, e por MATZENAUER *et alii* (43), no verão, embora a época de ocorrência do pico observada pelos autores tenha sido antecipada de algumas semanas.

Após ter atingido o valor máximo, durante a fase de maturação, o K_c diminuiu para 0,98 no período de 108 a 115, renunciando a redução do consumo de água (Figura 5-b) e da atividade fotossintética (Figura 6), que ocorrem no final do ciclo da cultura (43).

5. RESUMO E CONCLUSÕES

O experimento foi conduzido em um Latossolo Vermelho-Escuro álico, fase relevo suave ondulado cerrado, em área cultivada por mais de duas décadas, no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo - EMBRAPA, Município de Sete Lagoas, MG, onde se estudou:

a) o balanço de água no solo sob cerrado cultivado com milho, sob condições de irrigação por aspersão, com ênfase à técnica de separação dos fluxos de evapotranspiração e drenagem profunda;

b) o fluxo de evapotranspiração da cultura irrigada por aspersão, dos estádios de maior consumo de água pela planta;

c) a relação entre o fator de cultura (K_c) e os estádios de crescimento da cultura do milho, sob condições de irrigação por aspersão;

d) o efeito do decréscimo da água disponível no solo no fluxo de evapotranspiração da cultura, com a determinação do ponto crítico de umidade abaixo do qual o fluxo de evapotranspiração reduz do seu valor máximo e

e) o estabelecimento de uma função que possibilita a determinação do fluxo de evapotranspiração real da cultura, em função do fluxo de evapotranspiração de referência, do coeficiente de cultura e da porcentagem de água disponível, para o período de maior consumo de água pela planta.

Pela análise, pela interpretação e pela discussão dos resultados, concluiu-se que:

1) a determinação dos limites inferior e superior de água disponível no campo é de suma importância para o estudo da influência do teor de umidade do solo no fluxo de evapotranspiração da planta, com vistas ao manejo da irrigação;

2) embora o sistema radicular do milho, nas condições estudadas, esteja concentrado nas camadas superficiais do perfil do solo, o movimento ascendente de água contribuiu significativamente para o suprimento de água para a planta, principalmente depois de um período prolongado de estresse;

3) a técnica de separação dos fluxos de evapotranspiração e de drenagem profunda, utilizando-se perfis de umidade e de potencial total de água no solo, mostrou-se confiável nos períodos de déficit hídrico definidos, falhando, porém, nos períodos chuvosos em que ocorrem aumentos no armazenamento de água no solo;

4) a perda de água por drenagem profunda chegou a representar 67% do total das perdas de água (drenagem e evapotranspiração), por volta dos 60 dias após o plantio, decrescendo em seguida para 23%, como consequência do desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea da planta, comprovando o caráter dinâmico da água no sistema solo-água-planta-atmosfera e a importância desse componente no balanço de água no solo;

5) o fluxo de evapotranspiração médio da cultura, sem limitação hídrica, foi de $1,94 \text{ mm dia}^{-1}$ no período de 42 a 60 dias após o plantio (DAP), aumentando rapidamente para $5,19 \text{ mm dia}^{-1}$ no período de 60 a 84 DAP, atingindo o máximo de $5,96 \text{ mm dia}^{-1}$ no período de 84 a 108 DAP e decrescendo em seguida para $4,25 \text{ mm dia}^{-1}$ no período de 108 a 115 DAP;

6) a redução no fluxo de evapotranspiração da cultura de um valor médio máximo de $5,49 \text{ mm dia}^{-1}$, para praticamente zero, em decorrência do déficit hídrico, causou um decréscimo no rendimento de grãos de 25% em relação à produção sem limitação hídrica;

7) a equação de regressão da evapotranspiração real,

em relação a evapotranspiração máxima da cultura (E_{Tr}/E_{Tmax}) versus o número de dias após o plantio (DAP), durante o período de déficit hídrico, é do tipo linear e apresentou um coeficiente de determinação de 96%;

8) a relação E_{Tr}/E_{Tmax} permaneceu em torno da unidade por aproximadamente dez dias após a última irrigação, refletindo a grande susceptibilidade do milho cultivado nesse solo ao déficit hídrico;

9) a relação E_{Tr}/E_{Tmax} começou a decrescer da unidade a partir do momento em que o teor médio de umidade da camada de 0 a 100 cm do perfil do solo atingiu $0,315 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, o que representa 44% da água disponível na referida camada;

10) durante a fase de maior consumo de água da cultura do milho, submetida à déficit hídrico, o fluxo de evapotranspiração real da cultura (E_{Tr}) pode ser determinado em função do fluxo de evapotranspiração de referência (E_{To}), do coeficiente de cultura (Kc) e da porcentagem de água disponível na camada de 0 a 100 cm do perfil (AD_{100}), por intermédio da equação $E_{Tr} = (1 - 1/44 AD_{100}) Kc E_{To}$, e

11) o valor médio do coeficiente de cultura (Kc) foi de 0,32 no período de 42 a 60 dias após o plantio (DAP) aumentando para 1,13 no período de 60 a 84 DAP, atingindo o máximo de 1,23 no período de 84 a 108 DAP e decrescendo para 0,98 no período de 108 a 115 DAP.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- x 1. AVELAR, B.C. *Cinquenta anos de observações meteorológicas de Sete Lagoas, MG.* Sete Lagoas, EMBRAPA/CNPMS, 1982. 33 p. (Boletim Agrometeorológico, 4).
2. BAIER, W. Concepts of soil moisture availability and effect on soil moisture estimates from a meteorological budget. *Agricultural Meteorology*, 6: 165-178, 1969.
3. BARROS FERRAZ, E.S. *Estudo da evapotranspiração real através da medida de umidade do solo por moderação de neutrons.* Piracicaba, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP-CNEN, 1972. 40 p. (Boletim Científico, 5).
4. BELTRAME, L. & TAYLOR, J.C. Uso da sonda de neutrons para determinação da umidade do solo no campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 4: 57-61, 1980.
5. BERNARDO, S. *Manual de irrigação.* 4. ed. Viçosa, UFV, Imprensa Universitária, 1986. 488 p.
6. BLACK, T.A.; GARDNER, W.R.; THURTELL, G.W. The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil. *Soil Science Society America Proceeding*, 33: 655-660, 1969.
7. BLACK, T.A.; GARDNER, W.R.; TANNER, C.B. Water storage and drainage under a row crop on sandy soil. *Agronomy Journal*, 62: 43-51, 1970.

8. BORG, H. *Plant available water*. Wisconsin, University of Wisconsin, 1980. 78 p. (Tese-M.S.).
9. BRUNINI, O.; GROHMANN, F.; SANTOS, J.M. dos. Balanço hídrico em condições de campo para dois cultivares de arroz sob duas densidades de plantio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 5: 1-6, 1981.
- * 10. BRUNINI, O.; ALFONSI, R.R.; CAMARGO, M.B.P. de. Efeitos dos elementos climáticos no desenvolvimento da cultura do milho. In: SEMINÁRIO SOBRE PRODUTIVIDADE DO MILHO; Londrina, 1983. *Resumos...* Londrina, IAPAR, 1983. p. 21-40.
11. CAMERON, D.R. Prediction of field soil water content. *Soil Science Society of American Journal*, 43: 390-394, 1979.
12. CHOUDHURY, E.N. & MILLAR, A.A. Retenção e movimento de água em Latossolo Vermelho-Amarelo irrigado de Petrolina (PE). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 7: 21-26, 1983.
13. COSTA, E.F. da; COUTO, L.; AVELAR, B.C. Infiltração e redistribuição de água em um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico, fase cerrado, no campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 18, Salvador, *Anais...* 1981. Salvador, s. ed. 1981. np.
14. COUTO, L.; COSTA, E.F. da; SANS, L.M.A.; LEÃO, A.A. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman utilizando programa de computador na linguagem BASIC. *Série Documento EMBRAPA*. (no prelo).
15. CRUCIANI, D.E. *Balanço hídrico em solo cultivado com cana-de-açúcar*; utilização do método da moderação de neutrons. Piracicaba, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP-CNEN, 1972. 35 p. (Boletim Científico, 6).
16. DAVIDSON, J.M.; STONE, L.R.; NIELSEN, D.R.; LARUE, M.E. Field measurement and use of soil-water properties *Water Resources Research*, 5: 1312-1321, 1969.
- * 17. DENMEAD, O.T. & SHAW, R.H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agronomy Journal*, 54: 385-390, 1962.

18. DIAS, U.S. *Evaporação limite e distribuição da sucção, medidas e estimadas em colunas de materiais de solos argilosos*. Viçosa, UFV, Imprensa Universitária, 1981. 49 p. (Tese-M.S.).
- x 19. DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. *Guidelines for predicting crop water requirements*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1977. 144 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).
20. EAGLEMAN, J.R. & DECKER, W.L. The role of soil moisture in evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 57: 626-629. 1965.
- x 21. EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Classificação de Solos. *Manual de métodos de análises de solo*. Rio de Janeiro, 1979. n.p.
22. EMBRAPA. *Cultura do milho*. Brasília. CNPMS/EMBRATER, 1983. 302 p. (EMBRATER. Articulação Pesquisa-Extensão, 3).
23. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. *Relatório Técnico Anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo 1980-1984*. Sete Lagoas, MG, 1986. 190 p.
24. ESPINOZA, W. Efeito da densidade de plantio sobre a evapotranspiração do milho irrigado na época da seca, em cerrado do Distrito Federal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 14: 343-350, 1979.
25. ESPINOZA, W. Extração de água pelo milho em Latossolo da região dos cerrados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 15: 69-78, 1980.
26. ESPINOZA, W. Resposta de doze cultivares de milho ao déficit hídrico. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 17: 905-915, 1982.
27. FERNANDES, B.; RESENDE, M.; REZENDE, S.B. de Caracterização de alguns solos sob cerrado e disponibilidade d'água para culturas. *Experientiae*, 24: 209-260, 1978.
- x 28. GARDNER, W.R. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Science*, 89: 63-73, 1960.

29. GARDNER, W.R. Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agronomy Journal*, 56: 41-45, 1964.
- x 30. GARDNER, W.R. & NIEMAN, R.H. Lower limit of water availability to plants. *Science*, 143: 1460-1462, 1964.
31. GAVANDE, S.A. *Física de suelos*. México, Limusa-Wiley, 1972. 351 p.
32. GOODWIN, J.B.; GARAGORRY, F.L.; ESPINOZA, W.; SANS, L.M.; YOUNGDHAL, L.J. Modelling soil-water-plant relationships in the cerrado soils of Brazil: The case of maize (*Zea mays* L.). *Agricultural Systems*, 8: 115-127, 1982.
33. GREMINGER, P.J.; SUD, Y.K.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of field-measured soil-water characteristics. *Soil Science Society of America Journal*, 49: 1075-1082, 1985.
34. HANKS, R.J.; GARDNER, H.R.; FAIRBOURN, M.L. Evaporation of water from soils as affected by drying with wind or radiation. *Soil Science Society America Proceedings*, 31: 593-598, 1967.
35. HAVERKAMP, R.; VAUCLIN, M.; VACHAUD, G. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 1. Local standpoint. *Soil Science*, 137: 78-90, 1984.
36. HISAO, T.C. Plant response to water stress. *Annual Review Plant Physiology*, 24: 519-570, 1973.
37. JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; PRATT, B.T. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. *Transactions of the ASAE*, 14: 954-959, 1971.
38. KALMS, J.M. & IBERNON, J. Modalités d'alimentation en eau du riz pluvial: Bilan des recherches méthodologiques effectuées à Bouaké en Côte d'Ivoire. *L'Agronomie Tropicale*, 38: 198-205, 1983.
39. KRAMER, P.J. *Relaciones hídricas de suelos y plantas ; una síntesis moderna*. México, Edutex, 1969. 538 p.

40. LEMOS, R.C. & SANTOS, R.D. *Manual de métodos de trabalho de campo*. 4. ed. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1976. 36 p.
41. LOPES, A.S. *Solos sob "cerrado"; características, propriedades e manejo*. Piracicaba, Instituto da Potassa & Fosfato/Instituto Internacional da Potassa, 1983. 162 p.
42. MAKKINK, G.F. & VAN HEEMST, H.D.J. The actual evapotranspiration and the soil moisture tension. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 4: 67-72, 1956.
43. MATZENAUER, R.; WESTPHALEN, S.L.; BERGAMASCHI, H. Relações entre a evapotranspiração do milho e as fórmulas de Penman e Thornthwaite. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 18: 1207-1214, 1983.
44. MCGOWAN, M. & WILLIAMS, J.B. The water balance of an agricultural catchment. I. Estimation of evaporation from soil water records. *Journal of Soil Science*, 31: 217-230, 1980.
45. MILLER, D.E. & AARSTAD, J.S. Available water as related to evapotranspiration rates and deep drainage. *Soil Science Society America Proceedings*, 35: 131-134, 1971.
46. MILLER, D.E. & AARSTAD, J.S. Estimating deep drainage between irrigation. *Soil Science Society America Proceedings*, 36: 124-127, 1972.
47. MONIZ, A.C. *Elementos de pedologia*. São Paulo, EDUSP, 1972. p. 45-47.
48. NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; ERH, K.T. Spatial variability of field-measured soil-water properties. *Hilgardia*, 42: 214-259, 1973.
49. PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London A.*, 193: 120-146, 1948.
50. PEREIRA, A.R.; BARROS FERRAZ, E.S.; REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L. *Estimativa da evapotranspiração e da drenagem profunda em cafezais cultivados em solos podzolizados Lins e Marília*. Piracicaba, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP-CNEN, 1974. 13 p. (Boletim Técnico, 14).

51. PETERS, D.B. Water availability. In: BLACK, C.A. ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p. 279-285. (Agronomy, 9).
52. REICHARDT, K. *Determinação da condutividade hidráulica em condições de campo para a estimativa da drenagem profunda em balanços hídricos*. Piracicaba, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP-CNEN, 1974. 12 p. (Boletim Científico, 15).
53. 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, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP-CNEN, 1974. 19 p. (Boletim Científico, 22).
- * 54. REICHARDT, K. *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. Campinas, Fundação Cargill, 1935. 486 p.
- * 55. REICHARDT, K. *A água na produção agrícola*. São Paulo, McGraw-Hill, 1978. 119 p.
56. REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; SAUNDERS, L.C.U.; CADIMA, Z. Dinâmica da água em solo cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 3: 1-5. 1979.
57. RICHARDS, L.A.; GARDNER, W.R.; OGATA, G. Physical process determining water loss from soil. *Soil Science Society America Proceedings*, 20: 310-314, 1956.
58. RITCHIE, J.T.; BURNETT, E.; HENDERSON, R.C. Dryland evaporative flux in a subhumid climate: III. Soil water influence. *Agronomy Journal*, 64: 168-173, 1972.
59. RITCHIE, J.T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8: 1204-1213, 1972.
60. RITCHIE, J.T. Influence of soil water status and meteorological conditions on evaporation from a corn canopy. *Agronomy Journal*, 65: 894-897, 1973.
61. RITCHIE, J.T. soil water availability. *Plant and Soil*, 58: 327-338, 1981.

62. 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. of Soil Res.*, 5: 11-19, 1967.
63. SLATYER, R.O. Evapotranspiration in relation to soil moisture. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 4: 73-76, 1956.
64. STONE, L.R.; HORTON, M.L.; OLSON, T.C. Water loss from an irrigated sorghum field: I. Water flux within and below the root zone. *Agronomy Journal*, 65: 492-495, 1973.
65. STONE, L.P.; HORTON, M.L.; OLSON, T.C. Water loss from an irrigated sorghum field: II. Evapotranspiration and root extraction. *Agronomy Journal*, 65: 495-497, 1973.
66. TANNER, C.B. Measurement of evapotranspiration. In: HAGAN, R.M.; HAISE, H.P.; EDMINSTER, T.W. *Irrigation of agricultural lands*. Madison, American Society of Agronomy, 1967. p. 534-555. (Agronomy, 11).
67. TANNER, C.B. & JURY, W.A. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. *Agronomy Journal*, 68: 239-243, 1976.
68. TANNER, C.B. *Relation of climate to leaching of solutes and pollutants through soil*. Madison, University of Wisconsin, 1977. 31 p. (Report to Environmental Data Service-NOAA. MG-34-72).
69. VACHAUD, G.; VAUCLIN, M.; RIOU, C.; CHAABOUNI, Z. Evapotranspiration en zone semi-aride de deux couverts végétaux (gazon, blé) obtenue par plusieurs méthodes: II. Méthodes neutroniques et tensiométriques. *Agronomie*, 5: 267-274, 1985.
70. VAN BAVEL, C.H.M.; STIRK, G.B.; BRUST, K.J. 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 Science Society America Proceedings*, 32: 310-317, 1968.
71. VAN BAVEL, C.H.M.; BRUST, K.J.; STIRK, G.B. Hydraulic properties of a Clay loam soil and the field measurement of water uptake by roots: II. The water balance of the root zone. *Soil Science Society America Proceedings*, 32: 317-321, 1968.

72. VASCONCELLOS, C.A.; SANS, L.M.A.; PACHECO, E.B. Influência da rotação de culturas no sistema radicular do milho e em algumas características químicas de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico da região de Sete Lagoas. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 16, Belo Horizonte, 1987. *Resumos...* Sete Lagoas, EMBRAPA/CNPMS, 1986. p. 99-100.
73. WILCOX, J.C. Rate of soil drainage following and irrigation: II. Effects on determination of rate of consumptive use. *Canadian Journal of Soil Science*, 40: 15-27, 1960.
74. WILCOX, J.C. Rate of soil drainage following an irrigation: III. A new concept of the upper limit of available moisture. *Canadian Journal of Soil Science*, 42: 122-128, 1962.
75. WILCOX, J.C. Rate of soil drainage following and irrigation: IV. Effects of consumptive use and soil depth on upper limit of available moisture. *Canadian Journal of Soil Science*, 42: 129-136, 1962.
76. YAO, A.Y.M. & SHAW, R.H. Effect of plant population and planting pattern of corn on water use and yield. *Agronomy Journal*, 56: 147-152, 1964.

APÊNDICES

APÊNDICE A

TEOR DE UMIDADE EM EQUILÍBRIO COM POTENCIAIS MATRICIAIS DE 0
A -1,500 MPa, VOLUME DE MACRO E MICROPOROS E ARMAZENAMENTO
DE ÁGUA NO VOLUME DE CONTROLE, PARA CINCO HORIZONTES
DO LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO ÁLICO, FASE CERRADO.
SETE LAGOAS, MG, 1986

QUADRO 1A - Teor de Umidade em Equilíbrio com Potenciais Matriciais de 0 a -1,500 MPa, Volume de Macro e Microporos e Armazenamento de Água no Volume de Controle, para Cinco Horizontes do Latossolo Vermelho-Escuro Álico, Fa Se Cerrado. Sete Lagoas, MG, 1986

POTENCIAL MATRICIAL (MPa)	HORIZONTES					MÉDIA PONDERADA	'A100 2/	
	Ap	A3	B1	B21	B22		(mm)	(%)
	PROFUNDIDADE - Z (cm)							
	0-10	10-26	26-49 (cm ³ cm ⁻³) 1/	49-102	102-142			
0	0,6580	0,5790	0,6236	0,6505	0,6739	0,6452	633,62	0
-0,006	0,3796	0,4559	0,4230	0,3868	0,3743	0,3964	405,46	63,43
-0,010	0,3465	0,4132	0,3851	0,3590	0,3527	0,3667	372,43	72,62
-0,030	0,3183	0,3874	0,3506	0,3295	0,3220	0,3365	342,50	80,94
-0,050	0,3045	0,3740	0,3356	0,3168	0,3119	0,3240	329,05	84,68
-0,080	0,2953	0,3665	0,3281	0,3105	0,3028	0,3164	321,99	86,64
-0,100	0,2895	0,3614	0,3227	0,3056	0,2990	0,3117	316,85	88,07
-0,300	0,2673	0,3359	0,3012	0,2902	0,2829	0,2935	297,75	93,38
-0,500	0,2609	0,3282	0,2925	0,2841	0,2781	0,2871	290,77	95,32
-1,000	0,2426	0,3075	0,2841	0,2763	0,2702	0,2770	279,72	98,39
-1,500	0,2339	0,2981	0,2782	0,2723	0,2658	0,2716	273,94	100,00
MACROPOROS	0,2784	0,1231	0,2006	0,2637	0,2996	-	-	-
MICROPOROS	0,3796	0,4559	0,4230	0,3868	0,3743	-	-	-

1/ - Média de 9 Repetições

2/ - Lâmina de Água Armazenada no Volume de Controle.

APÊNDICE B

TEOR DE UMIDADE DO SOLO, ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO VOLUME DE
CONTROLE, POTENCIAL TOTAL DE ÁGUA NO SOLO E POSIÇÃO DO
PLANO DE FLUXO ZERO, NO PERÍODO DE 42 A 115 DAP.

SETE LAGOAS, MG, 1986

QUADRO 1B - Teor de Umidade do Solo das Parcelas 01 e 02 e Armazenamento de Água no Volume de Controle, no Período de 42 a 115 DAP. Sete Lagoas, MG, 1986

PROF. DAP (dias)	PARCELA 01									PARCELA 02								
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	A100	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	A100
				(cm ³ cm ⁻³)					(mm)				(cm ³ cm ⁻³)					(mm)
42	0,3543	0,3804	0,3827	0,3659	0,3543	0,3544	0,3488	0,3866	367,52	0,3470	0,3915	0,3699	0,3547	0,3337	0,3285	0,3359	0,3723	359,36
43	0,3568	0,3820	0,3780	0,3657	0,3518	0,3532	0,3502	0,3892	366,86	0,3322	0,3827	0,3710	0,3576	0,3378	0,3423	0,3380	0,3733	356,26
44	0,3599	0,3863	0,3816	0,3638	0,3490	0,3539	0,3491	0,3851	364,12	0,3178	0,3784	0,3676	0,3526	0,3414	0,3411	0,3348	0,3675	351,56
45	0,3217	0,3753	0,3755	0,3653	0,3546	0,3522	0,3439	0,3794	358,48	0,3122	0,3792	0,3739	0,3588	0,3404	0,3354	0,3338	0,3749	352,90
46	0,2780	0,3341	0,3287	0,3178	0,3030	0,3047	0,3094	0,3401	312,32	0,2602	0,3350	0,3254	0,3097	0,2969	0,2994	0,3009	0,3263	305,44
47	0,2555	0,3194	0,3159	0,3147	0,2964	0,3001	0,3101	0,3349	300,38	0,2472	0,3238	0,3163	0,2992	0,3008	0,2917	0,2939	0,3261	297,46
48	0,2776	0,3143	0,3232	0,3123	0,3060	0,3053	0,3007	0,3404	306,68	0,2749	0,3254	0,3202	0,3081	0,2940	0,2893	0,2886	0,3297	304,52
49	0,2785	0,3235	0,3251	0,3225	0,3098	0,3071	0,3068	0,3431	311,88	0,2752	0,3365	0,3212	0,3099	0,2939	0,3006	0,2973	0,3357	307,34
50	0,2951	0,3471	0,3329	0,3210	0,3147	0,3118	0,3137	0,3395	322,16	0,2930	0,3383	0,3249	0,3256	0,3058	0,3097	0,3099	0,3451	317,52
51	0,2737	0,3148	0,3183	0,3049	0,2983	0,3009	0,3193	0,3313	302,00	0,2738	0,3162	0,3146	0,3054	0,2939	0,2929	0,2959	0,3162	300,78
52	0,3541	0,3579	0,3437	0,3331	0,3199	0,3191	0,3179	0,3538	341,74	0,3271	0,3630	0,3417	0,3229	0,3144	0,3075	0,3153	0,3485	333,82
53	0,3580	0,3735	0,3516	0,3333	0,3165	0,3188	0,3147	0,3515	346,58	0,3545	0,3778	0,3453	0,3193	0,3175	0,3104	0,3112	0,3506	342,88
54	0,3606	0,3881	0,3731	0,3376	0,3256	0,3194	0,3216	0,3440	357,00	0,3509	0,3868	0,3668	0,3379	0,3109	0,2998	0,3037	0,3450	350,66
56	0,3512	0,3694	0,3716	0,3498	0,3419	0,3485	0,3482	0,3880	356,78	0,3664	0,3806	0,3651	0,3454	0,3307	0,3262	0,3305	0,3700	357,64
57	0,3525	0,3692	0,3687	0,3684	0,3425	0,3505	0,3517	0,4014	360,26	0,3584	0,3804	0,3707	0,3502	0,3346	0,3293	0,3367	0,3829	358,86
58	0,3370	0,3567	0,3675	0,3596	0,3488	0,3475	0,3508	0,3856	353,92	0,3530	0,3621	0,3609	0,3506	0,3382	0,3307	0,3336	0,3735	352,96
59	0,3376	0,3602	0,3667	0,3641	0,3476	0,3436	0,3462	0,3999	355,24	0,3376	0,3705	0,3580	0,3518	0,3305	0,3295	0,3329	0,3824	349,68
60	0,3199	0,3461	0,3507	0,3449	0,3421	0,3348	0,3461	0,4009	340,74	0,3171	0,3584	0,3521	0,3386	0,3322	0,3264	0,3357	0,3701	339,68
61	0,3329	0,3416	0,3530	0,3501	0,3429	0,3416	0,3449	0,3915	344,10	0,3568	0,3575	0,3468	0,3358	0,3256	0,3273	0,3358	0,3787	344,50
62	0,3537	0,3286	0,3371	0,3347	0,3271	0,3216	0,3263	0,3730	336,24	0,3660	0,3557	0,3359	0,3300	0,3139	0,3140	0,3185	0,3582	340,30
63	0,3550	0,3403	0,3442	0,3368	0,3242	0,3178	0,3242	0,3725	240,10	0,3683	0,3563	0,3356	0,3246	0,3108	0,3155	0,3167	0,3531	339,12

Continua ...

QUADRO 1B - Cont.

DAP	PROF. [dias]	PARCELA 01								A100 (mm)	PARCELA 02								A100 (mm)
		0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160		0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	
		(cm ³ - cm ⁻³)									(cm ³ - cm ⁻³)								
64	0,3450	0,3502	0,3486	0,3384	0,3275	0,3241	0,3324	0,3691	342,74	0,3551	0,3619	0,3500	0,3295	0,3137	0,3129	0,3205	0,3469	342,04	
65	0,3550	0,3402	0,3461	0,3418	0,3239	0,3189	0,3292	0,3787	340,40	0,3609	0,3663	0,3478	0,3331	0,3152	0,3132	0,3163	0,3575	344,66	
66	0,3253	0,3440	0,3437	0,3450	0,3306	0,3242	0,3261	0,3677	337,72	0,3428	0,3568	0,3419	0,3287	0,3118	0,3157	0,3247	0,3557	336,40	
67	0,3257	0,3409	0,3526	0,3391	0,3301	0,3300	0,3316	0,3701	337,68	0,3313	0,3497	0,3505	0,3277	0,3153	0,3149	0,3153	0,3572	334,90	
68	0,3132	0,3404	0,3528	0,3339	0,3271	0,3155	0,3273	0,3619	333,48	0,3244	0,3474	0,3349	0,3272	0,3190	0,3127	0,3172	0,3546	330,58	
69	0,3072	0,3367	0,3449	0,3302	0,3186	0,3201	0,3324	0,3684	327,52	0,3139	0,3462	0,3376	0,3259	0,3165	0,3152	0,3239	0,3525	328,02	
70	0,3051	0,3313	0,3399	0,3408	0,3267	0,3257	0,3322	0,3742	328,76	0,3156	0,3386	0,3344	0,3230	0,3189	0,3173	0,3176	0,3548	326,10	
72	0,3217	0,3374	0,3431	0,3387	0,3328	0,3331	0,3382	0,3810	334,74	0,3462	0,3478	0,3434	0,3212	0,3173	0,3181	0,3280	0,3585	335,18	
73	0,3249	0,3168	0,3342	0,3238	0,3185	0,3216	0,3199	0,3686	324,04	0,3502	0,3351	0,3297	0,3173	0,3210	0,3127	0,3176	0,3414	330,66	
75	0,3563	0,3628	0,3369	0,3241	0,3148	0,3189	0,3220	0,3643	338,98	0,3659	0,3649	0,3538	0,3264	0,3150	0,3075	0,3181	0,3549	345,20	
76	0,3352	0,3368	0,3366	0,3250	0,3140	0,3164	0,3237	0,3619	329,52	0,3573	0,3580	0,3350	0,3204	0,3058	0,3087	0,3236	0,3542	335,30	
77	0,3529	0,3463	0,3417	0,3352	0,3227	0,3232	0,3314	0,3751	339,76	0,3773	0,3692	0,3436	0,3297	0,3144	0,3157	0,3283	0,3608	346,84	
78	0,3357	0,3461	0,3457	0,3410	0,3312	0,3237	0,3368	0,3833	339,94	0,3554	0,3439	0,3470	0,3219	0,3235	0,3163	0,3257	0,3649	338,34	
79	0,3275	0,3449	0,3409	0,3389	0,3265	0,3347	0,3406	0,3820	335,74	0,3456	0,3605	0,3486	0,3229	0,3213	0,3165	0,3280	0,3639	339,78	
81	0,3025	0,3426	0,3329	0,3278	0,3145	0,3201	0,3211	0,3490	324,06	0,2906	0,3569	0,3421	0,3253	0,3060	0,3031	0,3093	0,3474	324,18	
82	0,3506	0,3428	0,3471	0,3201	0,3159	0,3160	0,3246	0,3508	335,30	0,2995	0,3490	0,3417	0,3113	0,3031	0,3067	0,3090	0,3464	320,92	
83	0,3476	0,3460	0,3366	0,3293	0,3181	0,3272	0,3239	0,3497	335,52	0,2880	0,3407	0,3311	0,3160	0,3052	0,2998	0,3065	0,3423	316,20	
84	0,3352	0,3519	0,3320	0,3236	0,3137	0,3179	0,3175	0,3483	331,28	0,2815	0,3362	0,3263	0,3122	0,2993	0,3008	0,3017	0,3003	311,10	
85	0,3292	0,3364	0,3298	0,3200	0,3162	0,3175	0,3220	0,3476	326,32	0,2752	0,3261	0,3195	0,3017	0,2903	0,2979	0,3138	0,3447	302,56	
87	0,2992	0,3393	0,3253	0,3147	0,3144	0,3142	0,3218	0,3487	318,58	0,2451	0,3109	0,3051	0,2855	0,2788	0,2883	0,3046	0,3428	285,08	
88	0,3025	0,3362	0,3247	0,3163	0,3132	0,3108	0,3133	0,3452	318,58	0,2621	0,3116	0,3189	0,2927	0,2789	0,2947	0,2974	0,3257	292,84	

Continua ...

QUADRO 1B - Cont.

PROF. DAP (dia ²)	PARCELA 01									PARCELA 02										
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	A100	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	A100		
	(cm ³ cm ⁻³)									(mm)	(cm ³ cm ⁻³)									(mm)
89	0,3418	0,3507	0,3161	0,3128	0,3109	0,2925	0,3145	0,3486	326,46	0,2545	0,2999	0,2933	0,2812	0,2724	0,2851	0,3012	0,3394	280,26		
90	0,3286	0,3291	0,3141	0,3080	0,3042	0,3087	0,3140	0,3411	316,80	0,2548	0,3006	0,2873	0,2721	0,2581	0,2713	0,2981	0,3394	274,58		
91	0,2970	0,3358	0,3273	0,3152	0,3142	0,3144	0,3175	0,3490	317,90	0,2488	0,3005	0,2940	0,2823	0,2683	0,2779	0,3052	0,3459	278,78		
92	0,3513	0,3344	0,3151	0,3069	0,3055	0,3068	0,3136	0,3452	322,64	0,2816	0,2998	0,2881	0,2847	0,2715	0,2751	0,2963	0,3347	285,14		
93	0,3464	0,3376	0,3175	0,3054	0,3014	0,3058	0,3106	0,3420	321,66	0,2815	0,2958	0,2887	0,2739	0,2663	0,2701	0,2953	0,3390	281,04		
94	0,3397	0,3328	0,3239	0,3169	0,3093	0,3117	0,3163	0,3507	324,52	0,2733	0,2972	0,2908	0,2788	0,2696	0,2765	0,3010	0,3420	281,94		
95	0,3212	0,3291	0,3152	0,3061	0,2994	0,3017	0,3186	0,3430	314,20	0,2617	0,2927	0,2891	0,2742	0,2633	0,2682	0,2923	0,3165	276,20		
96	0,3155	0,3194	0,3147	0,3036	0,3041	0,3070	0,3101	0,3408	311,06	0,2518	0,2959	0,2839	0,2750	0,2577	0,2628	0,2870	0,3321	272,86		
97	0,3518	0,3449	0,3239	0,3109	0,3014	0,3088	0,3205	0,3447	328,58	0,2520	0,2975	0,2884	0,2793	0,2611	0,2668	0,2870	0,3423	275,66		
98	0,3309	0,3447	0,3264	0,3109	0,3019	0,2948	0,3107	0,3459	322,96	0,2470	0,2907	0,2891	0,2773	0,2633	0,2652	0,2938	0,3327	273,48		
99	0,3192	0,3435	0,3262	0,3095	0,3014	0,3131	0,3127	0,3487	323,96	0,2388	0,2893	0,2873	0,2735	0,2575	0,2614	0,2873	0,3342	269,28		
100	0,3334	0,3383	0,3210	0,3071	0,2980	0,3041	0,3114	0,3451	319,56	0,2427	0,2856	0,2845	0,2742	0,2643	0,2607	0,2822	0,3282	270,26		
101	0,3204	0,3375	0,3214	0,3058	0,3000	0,3106	0,3167	0,3456	317,02	0,2348	0,2871	0,2827	0,2690	0,2590	0,2604	0,2783	0,3329	266,52		
105	0,3558	0,3625	0,3282	0,3063	0,2988	0,3056	0,3097	0,3511	329,92	0,2294	0,2914	0,2736	0,2715	0,2622	0,2614	0,2742	0,3317	265,62		
106	0,3433	0,3547	0,3249	0,2971	0,2968	0,3035	0,3075	0,3460	323,36	0,2239	0,2724	0,2805	0,2703	0,2524	0,2514	0,2765	0,3249	259,90		
107	0,3302	0,3430	0,3246	0,3032	0,2978	0,2981	0,3036	0,3399	319,76	0,2216	0,2789	0,2723	0,2638	0,2494	0,2488	0,2756	0,3183	257,20		
10f	0,3231	0,3439	0,3300	0,3063	0,2924	0,2961	0,3017	0,3341	319,14	0,2203	0,2681	0,2736	0,2651	0,2548	0,2595	0,2758	0,3229	256,38		
10f	0,3285	0,3422	0,3178	0,3032	0,2952	0,2916	0,3045	0,3285	317,38	0,2210	0,2756	0,2702	0,2656	0,2512	0,2494	0,2678	0,3225	256,72		
112	0,3648	0,3843	0,3602	0,3518	0,3144	0,2998	0,3062	0,3382	355,10	0,2272	0,2798	0,2850	0,2763	0,2710	0,2771	0,2948	0,3619	267,86		
113	0,3450	0,3586	0,3462	0,3355	0,3144	0,3068	0,3042	0,3410	339,54	0,2208	0,2773	0,2834	0,2754	0,2647	0,2618	0,2730	0,3196	264,32		
113	0,3372	0,3615	0,3533	0,3297	0,3157	0,3098	0,3134	0,3451	339,48	0,2248	0,2861	0,2808	0,2779	0,2600	0,2611	0,2792	0,3278	265,92		

QUADRO 2B - Potencial Total de Água no Solo das Parcelas 01 e 02 e Posição do Plano de Fluxo Zero, no Período de 42 a 115 DAP. Sete Lagoas, MG, 1986

DAP (dias)	PARCELA 01 (10 ⁻⁴ M Pa)										PFZ (cm)	PARCELA 02 (10 ⁻⁴ M Pa)										PFZ (cm)
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180		0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180	
42	-57	-95	-87	-142	-169	-189	-195	-215	-214	10	-50	-102	-94	-121	-176	-175	-223	-222	-235	10		
43	-78	-130	-129	-170	-190	-210	-216	-243	-249	10	-85	-109	-129	-156	-183	-175	-236	-229	-235	10		
44	-106	-136	-136	-163	-196	-216	-216	-236	-249	10	-140	-123	-129	-163	-183	-182	-236	-222	-235	10		
45	-196	-143	-136	-163	-190	-210	-216	-243	-242	20	-295	-157	-122	-163	-183	-182	-230	-222	-221	20		
46	-525	-178	-143	-173	-190	-210	-216	-250	-242	40	-661	-171	-129	-156	-190	-168	-230	-229	-221	40		
47	-1313	-284	-115	-135	-162	-189	-174	-203	-193	40	-1721	-248	-94	-128	-148	-154	-209	-194	-193	40		
48	-85	-326	-143	-176	-183	-196	-188	-250	-221	40	-266	-340	-129	-114	-162	-182	-216	-208	-193	60		
49	-120	-333	-150	-190	-176	-210	-195	-243	-214	40	-380	-404	-143	-142	-169	-175	-230	-194	-221	60		
50	-71	-220	-150	-183	-169	-216	-209	-236	-221	10	-282	-541	-170	-156	-176	-175	-223	-201	-221	60		
51	-113	-362	-177	-183	-176	-216	-188	-256	-221	40	-465	-615	-184	-149	-169	-182	-209	-201	-221	60		
52	-85	-109	-136	-176	-169	-223	-209	-256	-221	10	-85	-228	-171	-170	-190	-175	-216	-201	-235	10		
53	-78	-116	-101	-183	-183	-210	-202	-243	-228	10	-106	-150	-136	-176	-196	-175	-202	-222	-221	10		
54	-71	-109	-101	-163	-176	-203	-195	-222	-228	10	-99	-109	-108	-156	-176	-168	-209	-201	-207	10		
55	-78	-109	-108	-170	-155	-203	-188	-201	-221	10	-99	-109	-115	-128	-148	-161	-195	-201	-207	10		
56	-78	-123	-115	-156	-155	-189	-188	-215	-221	40	-96	-123	-108	-121	-176	-154	-202	-194	-242	40		
57	-133	-164	-122	-163	-176	-196	-188	-222	-242	40	-175	-143	-122	-135	-169	-168	-209	-194	-221	40		
58	-580	-227	-122	-163	-176	-189	-188	-222	-207	40	-380	-192	-129	-135	-183	-161	-195	-180	-221	40		
59	-877	-425	-129	-163	-183	-189	-181	-222	-221	40	-883	-312	-156	-149	-190	-175	-216	-208	-235	60		
60	-1094	-690	-143	-156	-155	-182	-195	-222	-228	40	-1089	-461	-150	-149	-183	-154	-174	-159	-200	60		
61	-268	-882	-150	-176	-162	-196	-195	-229	-221	10	-168	-621	-191	-149	-190	-168	-202	-187	-221	60		
62	-85	-249	-156	-170	-176	-182	-195	-236	-221	10	-113	-333	-184	-163	-210	-161	-202	-180	-221	60		
53	-92	-123	-143	-163	-169	-203	-195	-215	-235	10	-99	-185	-198	-142	-210	-196	-202	-194	-207	10		

Continua ...

QUADRO 2B - Cont.

PROF. DAP (dias)	PARCELA 01										PARCELA 02											
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	PFZ	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	PFZ		
	(10 ⁻⁴ M Pa)										(cm)	(10 ⁻⁴ M Pa)										(cm)
64	-92	-130	-108	-156	-162	-196	-202	-215	-221	10	-99	-136	-122	-170	-203	-216	-195	-215	-249	10		
65	-85	-130	-122	-156	-176	-189	-195	-243	-235	40	-113	-157	-129	-156	-196	-168	-216	-208	-249	40		
66	-106	-143	-108	-149	-169	-175	-195	-222	-221	40	-133	-164	-129	-156	-190	-196	-195	-215	-124	40		
67	-182	-199	-122	-149	-169	-182	-188	-215	-207	40	-210	-178	-143	-156	-196	-168	-188	-208	-221	40		
68	-431	-375	-129	-135	-176	-175	-181	-236	-228	40	-261	-255	-143	-149	-190	-182	-188	-208	-214	40		
69	-2019	-682	-136	-142	-176	-182	-174	-236	-221	40	-987	-397	-248	-163	-196	-182	-188	-208	-207	60		
70	-2038	-890	-156	-183	-190	-203	-188	-236	-235	40	-1423	-542	-177	-163	-197	-196	-202	-222	-193	60		
72	-367	-864	-212	-197	-190	-203	-188	-222	-235	60	-304	-658	-226	-183	-197	-182	-209	-208	-228	60		
73	-127	-433	-205	-183	-190	-189	-195	-208	-221	60	-140	-454	-212	-183	-197	-189	-195	-215	-235	60		
74	-113	-214	-198	-204	-203	-196	-181	-201	-235	10	-78	-186	-226	-142	-210	-217	-258	-306	-242	60		
75	-78	-164	-163	-190	-203	-196	-181	-215	-221	10	-99	-213	-164	-177	-204	-189	-209	-215	-229	40		
76	-78	-143	-129	-212	-190	-203	-174	-187	-221	10	-99	-192	-164	-176	-204	-161	-223	-208	-221	40		
77	-92	-157	-122	-183	-190	-196	-209	-222	-228	40	-106	-185	-170	-176	-203	-154	-216	-215	-235	40		
78	-126	-213	-163	-183	-203	-210	-195	-215	-235	40	-154	-227	-177	-183	-217	-182	-223	-222	-235	40		
79	-224	-347	-177	-183	-217	-203	-181	-208	-235	40	-245	-283	-198	-190	-210	-182	-230	-222	-235	60		
81	-2220	-1314	-219	-204	-259	-216	-195	-222	-214	60	-1772	-713	-262	-246	-232	-175	-223	-215	-263	100		
82	-92	-583	-269	-225	-280	-203	-209	-201	-228	100	-3680	-1184	-361	-397	-302	-196	-243	-229	-256	100		
83	-78	-348	-136	-247	-309	-203	-209	-222	-207	100	-5779	-1618	-492	-555	-374	-189	-243	-215	-242	100		
84	-99	-326	-205	-261	-330	-216	-223	-229	-249	100	-8023	-2797	-687	-766	-545	-203	-250	-229	-263	100		
85	-133	-383	-150	-265	-351	-350	-195	-222	-228	100	-10245	-4075	-948	-1350	-702	-210	-271	-222	-256	100		
87	-517	-901	-311	-331	-466	-216	-250	-229	-498	100	-14806	-7340	-2393	-2797	-2269	-272	-285	-229	-256	140		
88	-1297	-1230	-418	-395	-510	-237	-216	-236	-249	120	-14806	-8554	-3089	-3566	-2933	-364	-320	-250	-270	140		
89	-92	-534	-388	-460	-539	-244	-195	-209	-263	120	-14806	-9247	-4149	-4108	-2803	-517	-349	-243	-263	140		
90	-85	-390	-332	-504	-562	-230	-209	-209	-242	120	-14908	-10255	-5410	-4837	-3154	-622	-384	-250	-270	140		

Continua ...

QUADRO 2B - Cont.

PROF. DAP (dias)	PARCELA 01 (10 ⁻⁴ M Pa)										PARCELA 02 (10 ⁻⁴ M Pa)									
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	PFZ (cm)	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	PFZ (cm)
91	-92	-404	-240	-511	-591	-237	-195	-194	-263	120	-15010	-13039	-6784	-5902	-4100	-936	-321	-257	-270	140
92	-92	-484	-388	-511	-620	-251	-202	-222	-235	120	-8130	-13039	-8312	-6919	-4857	-1372	-634	-277	-304	140
93	-85	-411	-402	-504	-619	-251	-202	-229	-228	120	-3059	-11263	-8312	-6071	-4907	-1402	-664	-277	-311	140
94	-113	-411	-417	-518	-665	-237	-209	-243	-214	120	-2585	-10255	-8649	-6118	-4979	-1634	-696	-284	-333	140
95	-99	-462	-438	-483	-671	-244	-202	-243	-200	120	-4859	-10255	-8649	-7958	-5138	-2329	-827	-292	-375	140
96	-175	-593	-532	-628	-694	-244	-223	-229	-221	120	-11328	-13039	-9061	-8036	-6227	-2838	-1068	-320	-572	140
97	-92	-242	-360	-571	-754	-258	-209	-229	-235	120	-14908	-14816	-11358	-8180	-6342	-3649	-1459	-355	-697	140
98	-92	-247	-282	-409	-782	-286	-223	-243	-249	120	-15010	-14918	-12051	-8676	-8249	-5608	-2180	-433	-1661	140
99	-92	-235	-247	-359	-767	-265	-223	-243	-235	120	-15010	-14918	-12051	-9046	-8366	-5945	-2393	-477	-1422	140
100	-113	-291	-254	-331	-761	-265	-209	-236	-242	120	-15010	-14918	-13059	-9930	-8805	-7701	-2928	-574	-1792	140
101	-134	-342	-272	-331	-764	-268	-216	-228	-242	120	-15010	-14969	-13059	-10239	-9104	-8411	-3313	-613	-1792	140
102	-154	-392	-289	-331	-768	-272	-223	-222	-242	120	-15010	-15020	-13059	-10548	-9402	-9121	-3697	-651	-1792	140
104	-92	-150	-254	-288	-793	-300	-243	-243	-249	120	-15010	-15020	-14938	-13181	-10877	-13119	-5041	-1326	-2135	140
105	-113	-150	-198	-232	-614	-314	-223	-243	-242	120	-15010	-15020	-14938	-13181	-11398	-13119	-5116	-1539	-2588	140
106	-92	-143	-163	-211	-615	-293	-216	-236	-249	120	-15010	-15020	-15040	-13181	-12091	-13119	-5147	-1957	-2588	140
107	-106	-164	-170	-211	-540	-279	-223	-236	-242	120	-15010	-15020	-15040	-14958	-12091	-13119	-6194	-2144	-2595	140
108	-113	-220	-143	-183	-481	-286	-216	-229	-229	120	-15010	-15020	-15040	-14958	-13099	-13119	-6226	-2357	-2588	140
109	-120	-206	-184	-170	-459	-279	-216	-243	-236	120	-15010	-15020	-15040	-14958	-13099	-13119	-6226	-2596	-2342	160
110	-143	-234	-184	-176	-452	-279	-223	-250	-236	120	-15010	-15020	-15040	-14856	-11323	-14896	-6272	-2891	-2588	160
111	-99	-116	-150	-170	-431	-279	-216	-250	-249	120	-15010	-15020	-15040	-14958	-13099	-14896	-6349	-2898	-2595	160
112	-113	-130	-122	-156	-330	-265	-236	-229	-249	120	-15010	-15020	-15040	-14958	-13099	-14896	-6427	-2905	-2595	160
113	-120	-116	-122	-142	-267	-252	-223	-222	-249	120	-15010	-15020	-15040	-14958	-13099	-14896	-6464	-2919	-2595	160
114	-113	-130	-136	-142	-239	-251	-230	-243	-249	120	-15010	-15020	-15040	-14958	-13099	-14998	-6464	-2941	-2602	160
115	-92	-143	-115	-128	-211	-210	-202	-222	-242	120	-15010	-15020	-15040	-14958	-13099	-14896	-6513	-2680	-2157	160

APÊNDICE C

BALANÇO HÍDRICO GERAL, FLUXO MÉDIO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA E COEFICIENTE DE CULTURA, PARA OS QUATRO
PERÍODOS ESTUADOS.

SETE LAGOAS, MG, 1986

QUADRO 1C - Balanço Hídrico Geral, Fluxo Médio de Evapotranspiração de Referência e Coeficiente de Cultura, para os Quatro Períodos Estudados. Sete Lagoas, MG, 1986

DAP	Δt	C	PARCELA 01						ET _o	K _c	PARCELA 02					
			I	$\Delta A100$	Q _z	q _z	Q _e	q _e			I	$\Delta A100$	Q _z	q _z	Q _e	q _e
<u>1/</u>	<u>1/</u>	<u>2/</u>	<u>2/</u>	<u>2/</u>	<u>2/</u>	<u>3/</u>	<u>2/</u>	<u>3/</u>	<u>3/</u>	-	<u>2/</u>	<u>2/</u>	<u>2/</u>	<u>3/</u>	<u>2/</u>	<u>3/</u>
42- 60	18	46,19	54,49	-26,78	-72,46	-4,05	35,00	1,94	6,10	0,52	32,56	-19,68	-56,84	-3,16	41,59	2,30
60- 84	24	108,95	44,35	- 9,46	-38,23	-1,59	124,53	5,19	4,60	1,13	15,00	-28,58	-20,71	-0,86	131,82	5,49
84-108	24	10,02	107,10	-12,14	+15,82	+0,58	143,08	5,96	4,85	1,23	0	-54,72	+17,98	-0,75	82,72	3,45
108-115	07	8,28	40,93	+20,34	+ 0,90	+0,13	29,77	4,25	4,35	0,98	0	+21,02	+16,76	+2,39	4,02	0,57

1/ - Dias

2/ - mm

3/ - mm.dia⁻¹

APÊNDICE D

FLUXO DIÁRIO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA, ESTIMADO
PELO MÉTODO DE PENMAN.
SETE LAGOAS, MG, 1986.

QUADRO 1D - Fluxo Diário de Evapotranspiração de Referência, Estimado pelo Método de Penman. Sete Lagoas, MG, 1986

DAP	ET _o	DAP	ET _o	DAP	ET _o	DAP	ET _o	DAP	ET _o	DAP	ET _o	DAP	ET _o	DAP	ET _o
<u>1/</u>	<u>2/</u>														
42	6,16	52	4,74	62	2,50	72	2,61	82	5,36	92	3,91	102	5,30	112	4,30
43	6,37	53	4,45	63	4,77	73	2,80	83	5,34	93	5,05	103	4,48	113	5,23
44	6,58	54	4,11	64	6,02	74	2,42	84	5,21	94	6,08	104	3,10	114	4,17
45	6,73	55	5,97	65	6,11	75	3,71	85	5,48	95	4,53	105	5,10	115	5,39
46	6,68	56	6,85	66	5,96	76	5,57	86	5,20	96	5,49	106	4,20	116	4,88
47	6,88	57	6,39	67	6,28	77	5,29	87	4,37	97	5,32	107	4,33	117	4,88
48	6,63	58	5,43	68	5,14	78	6,41	88	3,73	98	4,91	108	2,88	118	4,79
49	7,10	59	5,96	69	3,23	79	6,40	89	5,06	99	5,03	109	5,10	119	4,96
50	6,63	60	4,01	70	3,05	80	6,17	90	5,37	100	5,51	110	3,80	120	4,46
51	6,14	61	2,78	71	2,52	81	5,93	91	4,94	101	4,66	111	5,00	121	4,86

1/ - Dias Após o Plantio (dias)

2/ - Evapotranspiração de Referência (mm dia⁻¹)

APÊNDICE E

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO
ÁLICO, FASE CERRADO.
SETE LAGOAS, MG. 1986.

QUADRO 1E - Características Químicas do Latossolo Vermelho-Escuro Álico, Fase Cerrado. Sete Lagoas, MG, 1986

HORIZONTE	PROF.	pH EM ÁGUA	Al	Ca	Mg	K	T	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅
-	(cm)	-	———— (Eq. mg. 100g ⁻¹) ————				(ppm)	———— (%) ————				
A _P	0 - 10	6,6	0,00	8,08	1,79	0,23	14,68	34,3	23,45	27,93	9,40	0,27
A ₃	10 - 26	5,5	0,20	4,85	1,30	0,08	15,92	10,0	24,17	29,39	9,29	0,23
B ₁	26 - 49	4,9	1,61	0,68	0,27	0,04	12,80	8,1	24,07	30,42	9,53	0,21
B ₂₁	49 - 102	4,5	1,46	0,37	0,16	0,03	10,74	3,7	24,31	31,06	9,60	0,18
B ₂₂	102 - 142	4,5	1,43	0,28	0,10	0,02	9,67	2,5	24,79	31,89	9,74	0,15
B ₂₃	142 - 175	4,3	1,23	0,26	0,07	0,02	8,64	1,7	25,35	32,30	9,61	0,13
B ₃	157 - 200 ⁺	4,2	0,87	0,24	0,07	0,01	7,56	0,8	24,64	31,45	9,16	0,12