

Manejo de Irrigação Através do Balanço de Água no Solo



Embrapa

*Ministério da Agricultura
e do Abastecimento*

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa
Centro de Pesquisa Agropecuária do Meio-Norte/CPAMN
Ministério da Agricultura e do Abastecimento

MANEJO DE IRRIGAÇÃO ATRAVÉS DO BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO

Valdemício Ferreira de Sousa¹
Antenor de Oliveira Aguiar Netto²
Aderson Soares de Andrade Júnior¹
Edson Alves Bastos³
Antônio de Pádua Sousa⁴
José Dantas Neto⁵

¹Eng. Agr. M.Sc. Irrigação e Dren., Embrapa/CPAMN. C. Postal 01. CEP: 64000-220 Teresina, PI

²Eng. Agr. M.Sc. Irrigação e Drenagem, UFSE-Aracaju, SE

¹Eng. Agr. M.Sc. Irrigação e Drenagem, Embrapa/CPAMN-Teresina, PI

³Eng. Agr. M.Sc. Irrigação e Dren., Bolsista do CNPq/Embrapa/CPAMN-Teresina, PI

⁴Eng. Agr., Professor Assistente Doutor, UNESP/Botucatu, SP

⁵Eng. Agr., Professor Doutor, UFPB-Campina Grande, PB

Embrapa-CPAMN. Documentos, 23

Exemplares desta publicação podem ser solicitados à:

Embrapa-CPAMN

Av. Duque de Caxias, 5650

Telefone (086) 225-1141

Fax: (086) 225-1142. E.mail: publ@cpamn.embrapa.com.br

Caixa Postal 01

Cep. 640006-220 Teresina, PI

Tiragem: 130 exemplares

Comitê de Publicações:

Eugênio Ferreira Coelho - Presidente

Eliana Candeira Valois - Secretária

Cândido Athayde Sobrinho

Aderson Soares de Andrade Júnior

Valdomiro Aurélio Barbosa de Souza

Paulo Henrique Soares da Silva

Tratamento Editorial:

Lígia Maria Rolim Bandeira

SOUSA, V.F. de; AGUIAR NETO, A. de O.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; BASTOS, E.A.; SOUSA, A. de P.; DANTAS NETO, J. **Manejo de irrigação através de balanço de água no solo.** Teresina: EMBRAPA CPAMN, 1997. 36p. (EMBRAPA-CPAMN. Documentos, 23).

Termos para indexação: irrigação; água; solo; balanço hídrico; evapotranspiração; irrigation; water; soil; water balance; evapotranspiration.

CDD 633.202

© Embrapa, 1997

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi elaborado após a coleta e análise de dados provenientes de vários anos de pesquisa com ensaios de campo, discussões em seminários, debates em congressos e buscas bibliográficas, visando oferecer conhecimentos e informações de aplicação prática do método de balanço de água no solo para o manejo de irrigação para culturas de notórias importância econômicas.

A determinação das necessidades de água em uma cultura irrigada é fundamental para o estabelecimento de uma exploração competitiva.

O trabalho aborda diversos aspectos determinantes do momento exato de irrigar e da quantidade de água necessária aos requerimentos de alta produtividade.

É destinado a um público esclarecido, com um mínimo de conhecimento técnico. É ideal para produtores com escolaridade relativamente elevada, extensionistas, professores, pesquisadores e técnicos em geral.

Espera-se ter contribuído para a melhoria do processo produtivo da agricultura irrigada, uma vez que, além dos conceitos necessários à compreensão do método de balanço de água no solo, este trabalho faculta um modelo simplificado que permite determinar a necessidade de irrigação, em solos cultivados.

Paulo Reis Pereira
Chefe Geral do CPAMN

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO	7
2.1. Capacidade de água disponível (CAD).....	10
2.2. Fator disponibilidade da água no solo (f).....	11
2.3. Profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (z)..	16
2.4. Evapotranspiração (ET).....	19
2.5. Coeficiente de cultivo (Kc)	23
2.6. Precipitação pluvial (P)	25
3. MODELO SIMPLIFICADO DE BALANÇO DE ÁGUA EM SOLOS CULTIVADOS	26
4. REFERÊNCIAS	30

1. INTRODUÇÃO

O objetivo básico da irrigação é fornecer água ao solo a fim de atender a demanda hídrica necessária ao ótimo desenvolvimento e produção das culturas. Isto deve ser alcançado da maneira mais eficiente possível, adotando-se medidas capazes de proporcionar um manejo de irrigação adequado. Todavia, considerando a irrigação como um complemento tecnológico capaz de garantir a produção agrícola e obter altas produtividades, envolvendo altos custos de instalação e manutenção, a aplicação de água deve ser feita em quantidade certa no momento exato.

O manejo da água em culturas irrigadas tem como ponto chave decidir como, quanto e quando irrigar. A quantidade de água a ser aplicada é normalmente determinada pela necessidade hídrica da cultura, podendo ser estimada através da evapotranspiração ou por meio da tensão de água no solo. Para se determinar o momento da irrigação, além dos parâmetros mencionados anteriormente, pode-se utilizar outras medidas de avaliação de água no solo, como o turno de irrigação, ou considerar os sintomas de deficiência de água nas plantas.

Vários são os processos encontrados na literatura que permitem estabelecer o manejo de irrigação. Entretanto, qualquer que seja o método, seu uso necessita de um mínimo de instrumentos e informações para possibilitar a execução de um manejo racional de água, os quais nem sempre estão disponíveis aos interessados.

Este trabalho tem por objetivo descrever a teoria e a aplicação prática do método de balanço de água no solo para manejo de irrigação.

2. BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO

O manejo da irrigação em uma área cultivada, através do método de balanço de água no solo, requer o controle diário da precipitação, da

irrigação, da evapotranspiração e das perdas por percolação profunda ou além do sistema radicular.

O balanço de água no solo em culturas irrigadas (Fig. 1) mostra que a quantidade de água necessária para determinada cultura deve ser suficiente para repor o consumo da planta, bem como todas as perdas ocorridas pelo sistema.

O balanço de água no solo em uma área cultivada é denominado de balanço hídrico real. Este balanço, segundo Reichardt (1985), é expresso pela equação:

$$\int_{t_0}^t (p + i - qe \pm qz) dt = \int_0^z \int_{t_0}^t \frac{d\theta}{dt} dt \cdot dz \dots\dots\dots(1)$$

onde:

p = fluxo de água devido à precipitação (cm³.cm⁻².dia⁻¹)

i = fluxo de água devido à irrigação (cm³.cm⁻².dia⁻¹)

qe = fluxo de água devido à evapotranspiração (cm³.cm⁻².dia⁻¹)

qz = fluxo de água no solo na profundidade z, podendo ser percolação profunda ou ascensão capilar (cm³.cm⁻².dia⁻¹)

θ = teor de água no solo (cm³.cm⁻³)

z = profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (cm)

t = tempo considerado na realização do balanço hídrico (número de dia)

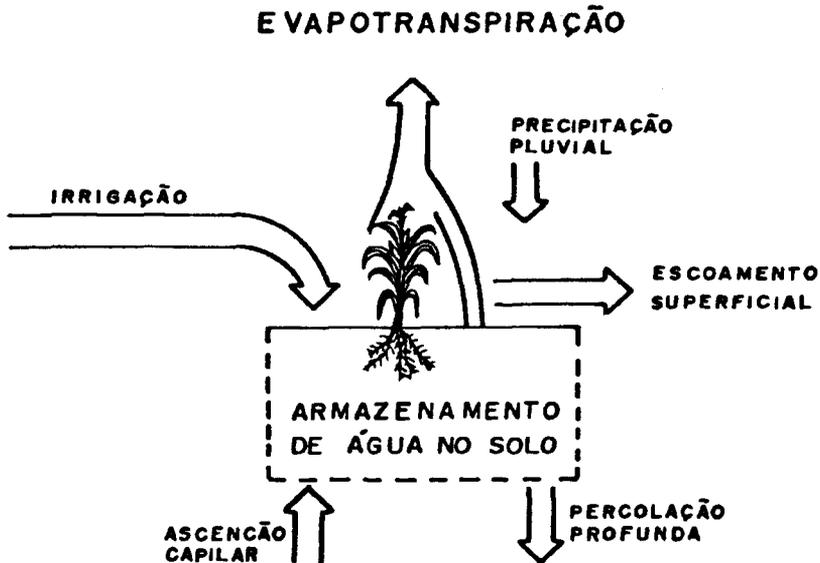


FIG. 1. Balanço de água no solo em culturas irrigadas (adaptado de Fereres et al., 1981).

De acordo com Bernardo (1986) e Reichardt (1987) a equação que expressa o balanço de água no solo pode ser simplificada para:

$$\Delta A_I = P + I - ET - D \dots\dots\dots(2)$$

onde:

ΔA_I = variação do armazenamento da água no solo (mm)

P = precipitação pluvial (mm)

I = lâmina líquida de irrigação (mm)

ET = evapotranspiração (mm)

D = lâmina de água percolada (mm)

O método de balanço de água no solo para definir o momento da irrigação tem-se mostrado muito eficiente (Marouelli et al., 1989 e Bernardo, 1989). Entretanto, de acordo com Resende (1987), a aplicação do método requer o conhecimento de: Capacidade de água disponível; Fator de disponibilidade da água no solo; Profundidade efetiva do sistema radicular da cultura; Evapotranspiração; Coeficiente de cultivo e Precipitação pluvial.

2.1. Capacidade de água disponível (CAD)

Com a introdução de novos conceitos dinâmicos para explicar o estado de água no solo, na planta e na atmosfera, a disponibilidade de água para os vegetais deixou de ser considerada em função somente de parâmetros estáticos do solo. Na realidade, aspectos inerentes ao sistema solo-planta-atmosfera, tais como textura, estrutura, fertilidade, condutividade hidráulica, relações teor de água-tensão, aptidão fisiológica da planta, estágio de desenvolvimento vegetal, profundidade e densidade do sistema radicular, deficit de pressão de vapor, vento e radiação solar são os fatores que norteiam a quantidade de água absorvida pelos vegetais (Reichardt, 1985)

Em razão das dificuldades para se caracterizarem todos os fatores envolvidos na disponibilidade de água para os vegetais, deve-se ainda considerar o solo como um reservatório de água para as plantas e quantificar a entrada e a saída de água em um solo cultivado.

A entrada de água em um solo cultivado pode ocorrer pela irrigação, precipitação pluvial ou ascensão capilar de água do subsolo. A partir de um ou mais desses processos inicia-se a movimentação de água no solo, sendo que a determinação da quantidade de água disponível para as plantas sempre foi um ponto controverso na literatura. Porém, admite-se como água disponível para as plantas, os teores de água retidos sob tensões situados entre 5 e 33 kPa para o limite superior, e 1500 kPa para o limite inferior.

O uso dos limites, superior e inferior de água disponível, de tensões

para inferir o teor de água no solo para o acompanhamento da irrigação, requer a determinação da curva de retenção de água no solo, geralmente obtida em laboratório. Conhecendo-se esses limites de tensão, determina-se, então, a capacidade de água disponível no solo.

2.2. Fator de disponibilidade da água no solo (f)

Um manejo adequado de irrigação tem por objetivo fornecer água às culturas suficiente para atender suas exigências hídricas, a ponto de não ocorrer redução significativa da produção. Para isso, o teor de água no solo deve ser mantido em um nível que permita a planta realizar seus processos fisiológicos, de forma a maximizar a taxa fotossintética. Isto só é possível quando a taxa de absorção de água pelas raízes é suficiente para atender a demanda evaporativa da atmosfera, mantendo assim a evapotranspiração próxima ao máximo (Penman et al., 1967).

As irrigações devem ser realizadas antes que a quantidade de água no solo atinja um nível capaz de reduzir os processos fisiológicos das plantas. Este nível de água determina o fator de disponibilidade da água no solo adequado para cada cultura, denominado de fator f , que corresponde a uma tensão de água no solo em que se deve proceder a irrigação, para maximizar a produtividade (Tabela 1).

TABELA. 1. Tensão de água no solo em que se deve fornecer água para as culturas a fim de maximizar a produtividade (Adaptado de Millar, 1984; Marouelli, et. al.;1989)

Culturas	Tensão de água no solo (kPa)
Alface	40-60
Alfafa	150
Algodão	100-300
Alho	15-30
Aspargo	50
Banana	30-150
Batata	30-50
Batata-doce	240
Cana-de-açúcar	80-150
Cebola	45-65
Cenoura	20-30
Cereais menores(vegetativo)	40-50
Cereais menores (maturação)	800-1200
Citros	20-100
Ervilha	30-50
Feijão	75-200
Melão	30-80
Melancia	30-80
Milho(vegetativo)	50-100
Milho(maturação)	800-1200
Milho-doce	30-50
Morango	20-30
Pastagens(gramíneas)	30-100
Pepino	100-300
Repolho	60-70
Soja	50-150
Sorgo	60-130
Tabaco	30-80
Tomate	80-150
Tomate industrial	100-400
Trigo	80-150
Trigo (maturação)	300-400
Videira (formadas)	100
Videira (novas)	40-50

A profundidade, a densidade e a distribuição do sistema radicular das plantas são os fatores mais importantes no processo de absorção de água. Para Danielson (1967) a distribuição das raízes com a profundidade, talvez seja o fator mais importante para a irrigação. Resende (1987) comenta que a densidade de raízes é um parâmetro de grande importância na determinação do fator *f*, uma vez que seu aumento (g de raiz.cm⁻³ de solo) causa uma redução na resistência do movimento de água no solo até a raiz, que pode ser demonstrado pela equação:

$$q = \frac{\Psi_m - \Psi_r}{R_{solo \rightarrow raiz}} = \frac{\Psi_m - \Psi_f}{R_p + R_s} = T \dots\dots\dots(3)$$

onde:

q = fluxo de água no solo, raiz, caule e folha (cm³.cm⁻².dia⁻¹)

Ψ_m = tensão de água no solo (kPa)

Ψ_r = potencial de água na superfície das raízes (kPa)

Ψ_f = potencial de água na folha (kPa)

R_s = resistência do solo (s.cm⁻¹)

R_p = resistência da planta (s.cm⁻¹)

T^p = fluxo de transpiração (cm³.cm⁻².dia⁻¹)

A Fig. 2 mostra que o aumento da densidade do sistema radicular permite um acréscimo da tensão de água no solo sem afetar a transpiração e o potencial de água na folha.

A taxa de evapotranspiração das plantas depende da disponibilidade de água e de sua resistência. Para manter alto fluxo de água no solo, o fator *f* deve ser bem menor do que em condições de baixa demanda evaporativa (Denmead & Shaw, 1962; Ekern et al., 1967).

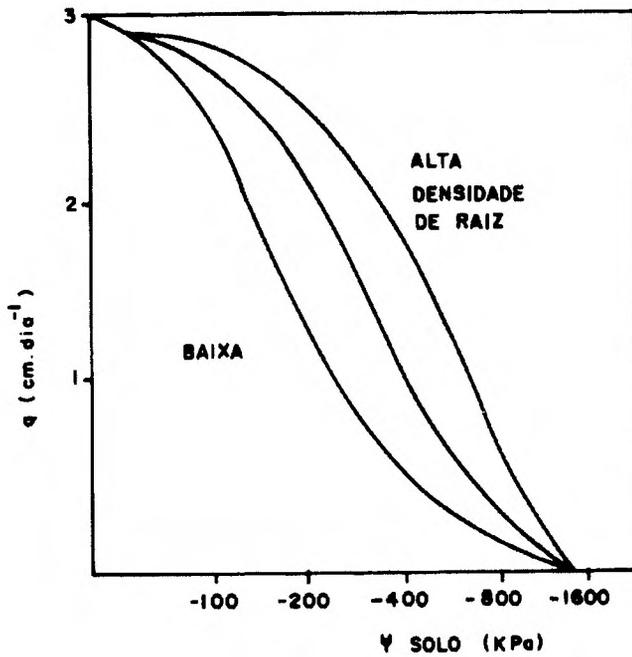


FIG. 2. Dependência do fluxo de transpiração e tensão de água no solo para diferentes densidades do sistema radicular das culturas, adaptado para valores de tensão em kPa (Crop Water Use, citado por Resende, 1987).

A Fig. 3 mostra que com a evapotranspiração elevada, a taxa de transpiração relativa cai sensivelmente com a redução da água no solo. Observa-se que com a evapotranspiração de $6,4 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ a redução da taxa de transpiração relativa inicia sua queda quando a tensão de água no solo aumenta acima de 20 kPa, enquanto para uma evapotranspiração de $1,4 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ esta redução ocorre nas tensões entre 250 e 5000 kPa.

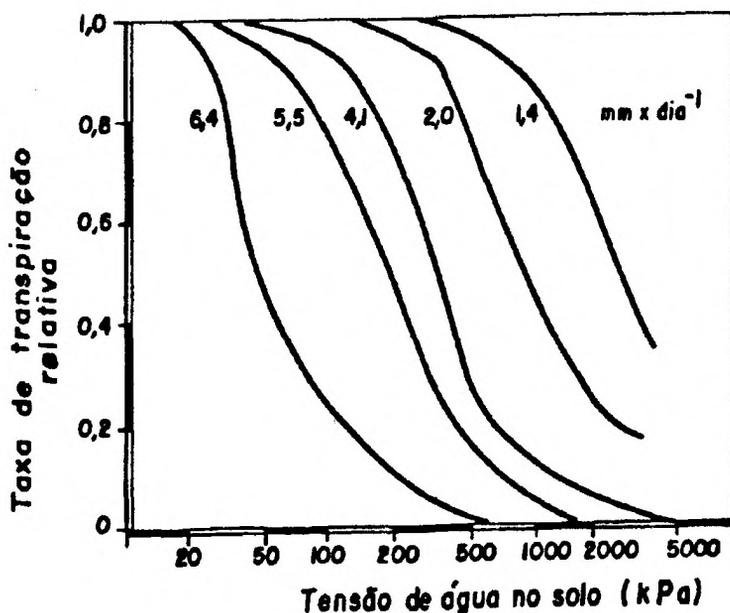


FIG. 3. Evapotranspiração das plantas em diferentes tensões de água no solo, adaptada para valores de tensão em kPa (Denmead & Shaw, 1962).

De acordo com a espécie vegetal ou cultivar, as plantas fecham os estômatos em diferentes valores de potencial de água na folha, para evitar a desidratação dos tecidos. Isto ocorre quando a taxa de evapotranspiração é superior a absorção de água pelas raízes, o que provoca uma perda de água dos tecidos para a atmosfera reduzindo o potencial hídrico foliar, ψ_f (Gates & Hanks, 1967).

Os estômatos de algumas espécies vegetais podem, também, fechar em resposta direta ao aumento do déficit de pressão de vapor (Farquhar & Sharquey, 1982; Shulze, 1986) ou decréscimo do teor de água no solo (Mansfield & Davies, 1985; Shulze, 1986), sem qualquer interferência do potencial de água da folha. Desta forma, de acordo com a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico, o fechamento dos estômatos pode interferir no fator f .

Os fatores do solo que afetam a determinação do fator f estão relacionados com a textura, estrutura e profundidade, uma vez que esses determinam a capacidade de armazenamento de água no solo.

2.3. Profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (z)

A profundidade efetiva do sistema radicular das culturas é fator importante no estabelecimento da capacidade de armazenamento de água no solo, porque determina a altura da lâmina de água que o solo pode armazenar na zona de concentração das raízes.

Danielson (1967) comenta que vários são os fatores do solo que influenciam no desenvolvimento das raízes, destacando entre eles textura, estrutura, temperatura, aeração, fertilidade e drenagem, além dos fatores inerentes à própria cultura.

Peter & Runkles (1967) e Kramer (1969) comentam que a penetração do sistema radicular das plantas no perfil do solo é função principalmente das características genéticas de cada espécie, as quais estão sujeitas às modificações do meio ambiente. As condições do meio, de modo geral,

determinam o desenvolvimento do sistema radicular, pois a compactação e a presença de impedimento químico no solo prejudicam o crescimento das raízes.

Para determinar a capacidade de armazenamento de água no solo (CAS), deve-se considerar a profundidade efetiva do sistema radicular (Tabela 2), ou seja, o volume do solo onde concentra-se a maior parte das raízes da planta. Matematicamente, a CAS pode ser expressa:

$$CAS = \frac{\mu_1 - \mu_2}{10} \times d_a \times z \dots\dots\dots(4)$$

onde:

CAS = Capacidade de armazenamento da água no solo (mm)

μ_1 = teor de água no limite superior da água disponível (%massa seca)

μ_2 = teor de água no limite inferior da água disponível (%massa seca)

d_a = densidade aparente do solo ($g.cm^{-3}$)

z = profundidade efetiva do sistema radicular(cm)

Assim a lâmina líquida de irrigação pode ser representada pela seguinte equação:

$$I = CAS \times f \dots\dots\dots(5)$$

onde:

I = lâmina líquida de irrigação (mm)

f = fator disponibilidade da água no solo

TABELA 2. Profundidade efetiva do sistema radicular de algumas culturas (Adaptado de Raposo, 1980).

Culturas	Profundidade efetiva(cm)
Abóbora	50 - 80
Alface	15 - 30
Alfafa	40 - 70
Algodão	50 - 110
Alho	20 - 40
Banana	30 - 50
Batata	25 - 60
Batata-doce	50 - 100
Cana de açúcar	50 - 120
Cebola	5 - 60
Cenoura	35 - 60
Cereais menores	50 - 100
Citros	60 - 150
Ervilha	50 - 70
Feijão	20 - 40
Melão	20 - 120
Melancia	50 - 120
Milho	30 - 60
Milho doce	30 - 50
Morango	20 - 40
Pastagens de gramíneas	40 - 100
Pepino	35 - 50
Soja	40 - 70
Sorgo	50 - 100
Tabaco	30 - 60
Tomate	25 - 70
Trigo	20 - 40
Videira	50 - 100

2.4. Evapotranspiração (ET)

O consumo de água pelas culturas, normalmente se refere a toda água transpirada através das plantas e evaporada da superfície do solo, mais a água retida nos tecidos vegetais. Já que esta parcela situa-se em torno de 1% do total evaporado durante todo o ciclo de crescimento, as necessidades das plantas se referem apenas à evapotranspiração.

A evapotranspiração de referência (ET_o), de acordo com Smith et al. (1991), deve ser definida como a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética com os seguintes parâmetros fixados: altura (12 cm), resistência do dossel (69 s.m⁻¹) e albedo (0,23). Esta evapotranspiração assemelha-se à de uma superfície revestida de grama verde de altura uniforme, em crescimento ativo, completamente sombreando o chão e sem restrição hídrica.

O clima é o principal fator na determinação da evapotranspiração, já que a taxa da evaporação da água depende da demanda atmosférica, podendo assim ser estimada, de acordo com Tanner(1967), através de métodos micrometeorológicos, empíricos ou diretos.

Em recentes estudos comparativos de métodos de estimativa da evapotranspiração com medidas diretas de ET_o, através de lisímetros, em vários locais do mundo, Allen (1986) e Allen et al.(1989) indicaram que o modelo de resistência de Penman-Monteith, método que combina o balanço de energia com a componente aerodinâmica, apresentou as mais confiáveis e consistentes estimativas de ET_o.

Smith et al. (1991) relatam que o modelo de resistência de Penman-Monteith é método recomendado pela FAO, por ser a equação de melhor performance, com padronização dos valores de resistência, cuja fórmula geral é a seguinte:

$$ET_o = \frac{\delta}{\delta + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{\delta + \gamma^*} \frac{900}{(T + 275)} U_2 (e_a - e_d) \quad (6)$$

onde:

E_{To} = Evapotranspiração de referência ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$)

R_n = radiação líquida na superfície da cultura ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$)

G = fluxo de calor no solo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$)

T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

U_2 = velocidade do vento medida a dois metros de altura ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

$(e_a - e_d)$ = déficit de pressão de vapor (kPa)

δ = inclinação da curva de pressão de vapor versus temperatura do ar ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

λ = calor latente de vaporização ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)

γ = constante psicrométrica ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

γ^* = constante psicrométrica modificada ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$) = $\gamma(1+0.33U_2)$
 $900 = \text{kJ}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot ^{\circ}\text{K}$

Os métodos empíricos são resultantes de correlações entre a evapotranspiração e elementos meteorológicos medidos em condições padronizadas, dentre os quais pode-se citar: Blaney-Clidde, Hargreaves-Samani e radiação solar. Na ausência de dados climáticos que dificultem o emprego do método de Penman-Monteith, esses métodos podem ser utilizados com critério.

Entre os métodos diretos para determinar a evapotranspiração de referência, a técnica da lisimetria, que baseia-se na lei da conservação de massa, é a mais precisa, possibilitando calcular a E_{To} desde pequenos intervalos de tempo até intervalos maiores. Uma extensa revisão sobre lisímetros foi realizada por Aboukhaled (1986).

O Tanque (USWB - United States Weather Bureau) Classe A (Fig. 4), para estimativa da evapotranspiração de referência, é bastante utilizado no mundo inteiro, devido, principalmente, a sua simplicidade de operação e custo relativamente baixo. Pesquisadores como: Sedyama & Bernardo (1973), Klar (1974) e Andreatta (1990) encontraram resultados satisfatórios de evapotranspiração determinados através deste método.

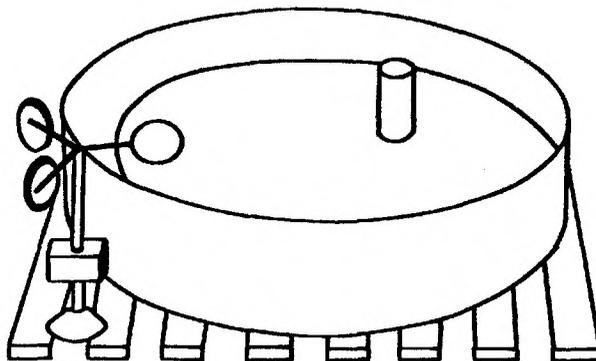


FIG. 4. Tanque Classe A instalado no campo, com detalhe do anemômetro e poço tranquilizador.

Para se calcular a evapotranspiração de referência, através do Tanque Classe A, precisa-se utilizar o coeficiente do tanque K_p (Tabela 3) que varia de acordo com a velocidade do vento, bordadura e a umidade relativa do ar. Assim aplica-se a equação:

$$ET_o = ECA \times K_p \dots\dots\dots(7)$$

onde:

- ET_o = evapotranspiração de referência (mm.dia^{-1})
- ECA = evaporação no Tanque Classe A (mm.dia^{-1})
- K_p = coeficiente do tanque.

TABELA 3. Coeficiente do tanque (Doorenbos & Pruitt, 1975).

Velocidade do vento (km.dia ⁻¹)	Bordadura (grama) (m)	Umidade relativa		
		baixa < 40%	média 40-70%	alta > 70%
175 (leve)	1	0,55	0,65	0,75
	10	0,65	0,75	0,85
	100	0,70	0,80	0,85
	100	0,75	0,85	0,85
175-425 (moderado)	1	0,50	0,60	0,65
	10	0,60	0,70	0,75
	100	0,65	0,75	0,80
	1000	0,70	0,80	0,80
475 - 700 (forte)	1	0,45	0,50	0,60
	10	0,55	0,60	0,65
	100	0,60	0,65	0,70
	1000	0,65	0,70	0,75

A evapotranspiração da cultura (ETc) é a perda de água por uma cultura qualquer sem restrição hídrica, em qualquer estágio do desenvolvimento. Para executar um adequado manejo de irrigação, deve-se repor toda água transferida do sistema solo-planta para a atmosfera. O cálculo da ETc na prática da irrigação é feito em função do coeficiente de cultivo (Kc).

2.5 - Coeficiente de cultivo (Kc)

O estudo do efeito do clima sobre o consumo de água durante as fases do ciclo da cultura pode ser feito através da determinação da razão entre a evapotranspiração máxima da cultura em uma dada fase de plantio e o valor da evapotranspiração de referência, no mesmo período (Doorenbos & Pruitt, 1975). Esta razão é conhecida como coeficiente de cultivo, sendo largamente utilizada para fins de planejamento, dimensionamento e manejo de irrigação. Uma vez que a evapotranspiração de referência é determinada através de dados meteorológicos ou instrumentos, pode-se estimar a evapotranspiração da cultura através da seguinte equação:

$$ETc = ETo \times Kc \dots\dots\dots(8)$$

onde:

ETc = evapotranspiração da cultura (mm.dia⁻¹);

ETo = evapotranspiração de referência (mm.dia⁻¹);

Kc = coeficiente de cultivo.

Do ponto de vista do balanço de energia, esse coeficiente adimensional representa a fração de energia calorífica convertida em calor latente, proposto por Van Wijk e de Vries (Sediyama, 1988).

Segundo Doorenbos & Kassam (1979), o Kc é uma função da cultura, estágio de desenvolvimento, velocidade do vento e umidade relativa. Sediyama (1988) acrescenta que o Kc pode variar com a textura e o teor de água no solo e que os valores de Kc são específicos para o valor estimado da evapotranspiração e não para uma cultura de referência. Por sua vez, Andreatta (1990) considera, também, a frequência da chuva e da irrigação.

O Kc é determinado experimentalmente através do balanço hídrico realizado com lisímetros. Quando na impossibilidade de usar lisímetro, pode-se fazer uso dos valores médios por período de desenvolvimento da cultura, sugeridos por Doorenbos & Pruitt (1975) e Doorenbos & Kassam (1979), apresentados na Tabela 4.

TABELA 4. Coeficiente de cultivo para algumas culturas em diferentes estádios de desenvolvimento e condições climáticas. Adaptado de Doorenbos & Pruitt (1975) e Doorenbos & Kassam (1979).

Culturas	Estádios de desenvolvimento da cultura ¹					Média do ciclo da cultura
	I	II	III	IV	V	
Abacaxi	0,40-0,50					
Alface			0,50-1,00	0,90-1,00	0,90-1,00	
Alfafa	0,30-0,40				0,05-1,20	0,85-1,05
Algodão	0,40-0,50	0,70-0,80	1,05-1,25	0,80-0,90	0,65-0,70	0,80-0,90
Amendoim	0,40-0,50	0,70-0,80	0,95-1,10	0,70-0,80	0,55-0,60	0,65-0,75
Banana	0,40-0,50	0,70-0,85	1,00-1,10	0,90-1,00	0,75-0,85	0,70-0,80
Batata	0,40-0,50	0,70-0,80	1,05-1,20	0,85-0,95	0,70-0,75	0,75-0,90
Beterraba	0,40-0,50	0,75-0,80	1,05-1,20	0,90-1,00	0,60-0,70	0,75-0,85
Cana de açúcar	0,40-0,50	0,70-1,00	1,00-1,30	0,75-0,80	0,50-0,60	0,85-1,05
Cebola	0,40-0,60	0,60-0,75	0,95-1,05	0,95-1,05	0,95-1,05	0,65-0,80
Cenoura	0,50-0,60	0,70-0,85	1,00-1,15	0,90-1,00	0,70-0,85	0,75-0,90
Cereais menores (cevada)			1,05-1,20		0,85-0,90	0,95-1,05
Citros						0,65-0,75
Ervilha	0,40-0,50	0,70-0,85	1,05-1,20	1,00-1,15	0,95-1,10	0,80-0,95
Feijão	0,30-0,40	0,65-0,70	0,95-1,05	0,90-0,95	0,85-0,95	0,85-0,90
Melancia	0,40-0,50	0,70-0,80	0,95-1,05	0,80-0,90	0,65-0,75	0,70-0,80
Melão	0,40-0,50	0,70-0,80	0,95-1,05	0,80-0,90	0,65-0,75	0,70-0,80
Milho	0,30-0,50	0,70-0,85	1,05-1,20	0,80-0,95	0,55-0,60	0,75-0,90
Milho doce	0,30-0,50	0,70-0,90	1,05-1,20	1,00-1,15	0,95-1,10	0,80-0,95
Pimentão	0,40-0,50	0,60-0,65	0,95-1,10	0,90-1,00	0,80-0,90	0,75-0,85
Pepino				0,90-1,00	0,70-0,80	0,80-0,90
Soja	0,30-0,40	0,70-0,80	1,00-1,15	0,70-0,80	0,40-0,50	0,75-0,90
Sorgo	0,30-0,40	0,70-0,75	1,00-1,15	0,75-0,80	0,50-0,55	0,75-0,85
Tabaco	0,30-0,40	0,70-0,80	1,00-1,20	0,90-1,00	0,75-0,85	0,85-0,95
Tomate	0,40-0,50	0,70-0,80	1,05-1,25	0,80-0,95	0,60-0,65	0,75-0,90
Trigo	0,30-0,40	0,70-0,80	1,05-1,20	0,65-0,75	0,20-0,25	0,80-0,90
Videira	0,35-0,55	0,70-0,80	0,80-0,90	0,60-0,80	0,55-0,70	0,55-0,75

Obs.: Estádio I - Inicial, da germinação até 10% da cobertura do solo;

Estádio II - Desenvolvimento vegetativo, com até 80% da cobertura do solo;

Estádio III - Intermediário, até o início da maturação;

Estádio IV - Final do ciclo, até o início do ponto de colheita;

2.6 - Precipitação pluvial(P)

A precipitação pluvial é a forma principal pela qual a água retorna da atmosfera para o solo de maneira natural. Ao atingir o topo das culturas, a chuva pode ser diretamente interceptada pelas folhas e outras partes das plantas, entretanto, dependendo da quantidade, a maior parte atinge a superfície do solo (Reichardt, 1987).

Dependendo da intensidade da chuva, tipo de solo e topografia da área, parte dela não penetra no solo e escorre superficialmente formando as enxurradas. A porção da água que se infiltra fica armazenada no solo e disponível às plantas, será denominada neste trabalho de precipitação efetiva (PE). O excesso de água, ou seja, aquela que ultrapassa a capacidade de armazenamento do solo, é drenado para fora da zona das raízes.

A quantidade e a distribuição da precipitação anual numa determinada área é muito importante e sua medição deve ser feita de forma que permita efetuar um manejo correto da água no solo. Esta medida é feita por meio de pluviômetro e pluviógrafo. O primeiro (Fig. 5) acumula a chuva ocorrida, devendo ser determinada posteriormente com uma proveta graduada em milímetros, e o segundo registra num diagrama apropriado, a ocorrência do fenômeno.

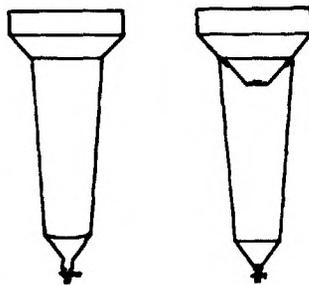


FIG. 5. Pluviômetros tipo “Ville de Paris”.

3. MODELO SIMPLIFICADO DE BALANÇO DE ÁGUA EM SOLOS CULTIVADOS

O balanço de água numa área cultivada é resultante da contabilidade de toda a água que entra e sai da superfície do solo.

Na seqüência, para fins de ilustração, descreve-se um modelo simplificado de balanço de água para a cultura do milho, cultivado na região de Sete Lagoas - MG, no período de outubro a fevereiro. No exemplo será considerado o período inicial e parte do desenvolvimento vegetativo.

Dados iniciais:

μ_1 = teor de água no limite superior da água disponível no solo = 37,7 %massa seca (Fig. 6)

μ_2 = teor de água no limite inferior da água disponível no solo = 26,4 %massa seca (Fig. 6)

d_a = densidade aparente do solo = 1,10 g.cm⁻³

z = profundidade efetiva do sistema radicular da cultura = 40 cm (Tabela 2)

f = fator de disponibilidade da água no solo . Pela Tabela 1, adotou-se uma tensão de 100 kPa para o milho. Assim, pela figura 6, $f = 0,65$ (65 % da água disponível)

K_p = coeficiente do tanque = 0,75 (Tabela 3)

Procedimentos:

I) Determina-se a capacidade de armazenamento de água do solo na zona de concentração das raízes, através da equação 4.

$$CAS = \frac{(37,7 - 26,4)}{10} \times 1,10 \times 40 \cong 50,0mm$$

II) Determina-se a lâmina líquida de irrigação, através da equação 5.

$$I = 50,0 \times 0,65 = 32,50mm$$

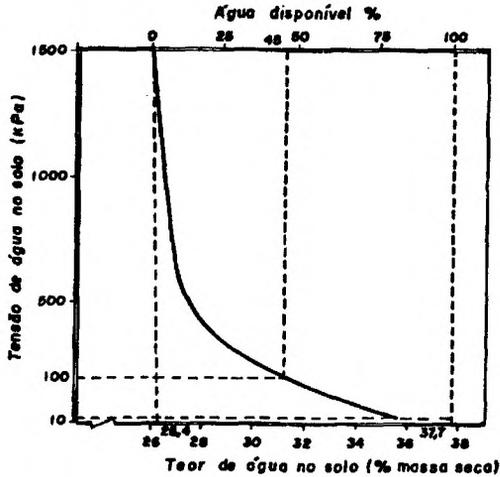


FIG. 6. Curva de retenção de água de um Latossolo Vermelho Amarelo, textura argilosa, adaptada para valores de tensão em kPa (Marouelli et al., 1989).

- III) Determina-se diariamente a evapotranspiração de referência. Para este exemplo, utilizou-se o método do tanque USWB classe A, através da equação 7.
- IV) Determina-se diariamente a evapotranspiração da cultura, através da equação 8 e Fig.7.
- V) Determina-se diariamente a chuva efetiva.
- VI) Determina-se diariamente a variação de armazenamento de água no solo e a necessidade de irrigação, através da equação 2. Por exemplo nos dias 27 e 28/10 (Tabela 5).

$$Al = Al_1 + PE + I - ETc - D$$

$$Al = 41,59 + 0,0 + 0,0 - 1,78 - 0,0 = 39,8$$

$$Al = 39,81 + 17,0 + 0,0 - 1,51 - 5,3 = 50,0$$

onde:

Al = água armazenada no solo (mm).

Al₁ = água armazenada no solo no dia anterior(mm).

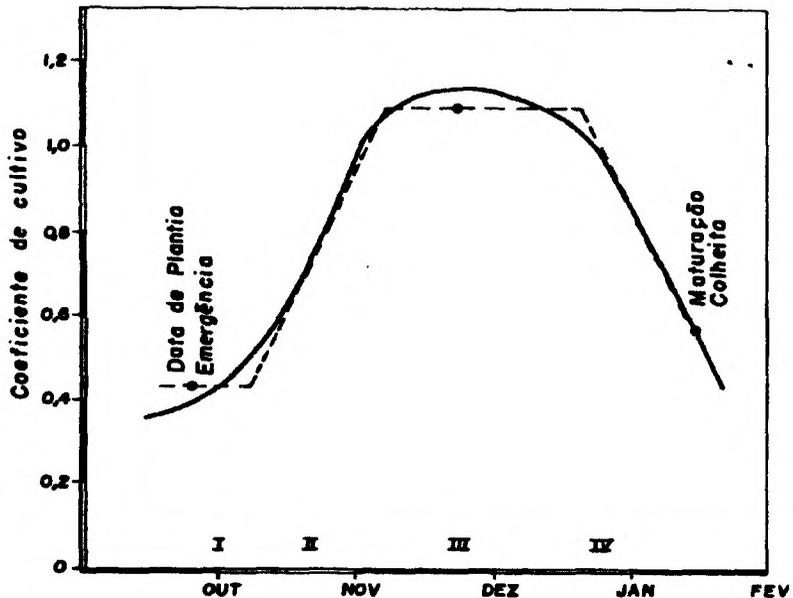


FIG. 7. Coeficiente de cultivo, obtido experimentalmente, para a cultura do milho em Sete Lagoas, MG (Resende, 1987).

A necessidade de irrigação ocorre todas as vezes em que a capacidade de armazenamento da água no solo aproximar-se do valor de 17,50 mm, ou seja, quando houver um consumo de cerca de 65% da água disponível. Desta forma, deve-se fornecer ao solo uma lâmina líquida de 32,50 mm.

A Tabela 5 e a Fig. 8 mostram como deve ser feito o manejo da irrigação através do método do balanço de água no solo.

TABELA. 5. Modelo simplificado de balanço de água no solo para manejo de irrigação.

Dia/mês	ECA ¹ (mm)	Kp	Kc	ETc (mm)	PE ¹ (mm)	Al. (mm)	Nec.de irrigação	Água per- colada
20/10	1 ^o Irrigação solo na tensão de 10 kPa					50,00		
21/10	5,5	0,75	0,36	1,49		48,51		
22/10	5,0		0,36	1,35		47,16		
23/10	6,6		0,36	1,78		45,38		
24/10	6,8		0,38	1,88		43,50		
25/10	6,7		0,38	1,91		41,59		
26/10	5,8		0,41	1,78		39,81		
27/10	4,9		0,41	1,51	17,0	50,00		5,30
28/10	4,7		0,44	1,55		48,45		
29/10	5,7		0,44	1,88		46,57		
30/10	5,9		0,47	2,08		44,49		
31/10	5,6		0,47	1,97		42,52		
01/11	5,7		0,50	2,14		40,38		
02/11	6,5		0,50	2,44		37,94		
03/11	6,0		0,54	2,43		35,51		
04/11	6,2		0,54	2,51		33,00		
05/11	5,6		0,58	2,44		30,56		
06/11	5,6		0,58	2,44		28,12		
07/11	5,8		0,61	2,65		25,47		
08/11	5,9		0,61	2,70		22,77		
09/11	5,5		0,65	2,68		20,09		
10/11	4,7		0,65	2,29		17,80		
11/11	4,9		0,69	2,54		47,76	32,50	
12/11	3,8		0,69	1,97		45,79		
13/11	6,0		0,73	3,29		42,50		
14/11	6,2		0,73	3,39		39,11		
15/11	6,1		0,74	3,39		35,72		
16/11	5,9		0,75	3,32		32,40		
17/11	5,8		0,76	3,31		29,09		
18/11	6,0		0,77	3,47		25,62		
19/11	6,2		0,78	3,63		21,99		

Obs.: 1 - Valores atribuídos; ECA - Evaporação do Tanque Classe A; Kp - Coeficiente do Tanque Classe A; Kc - Coeficiente da cultura (Fig.7); ETc - Evapotranspiração da cultura; PE - Precipitação efetiva; Al - Água armazenada no solo.

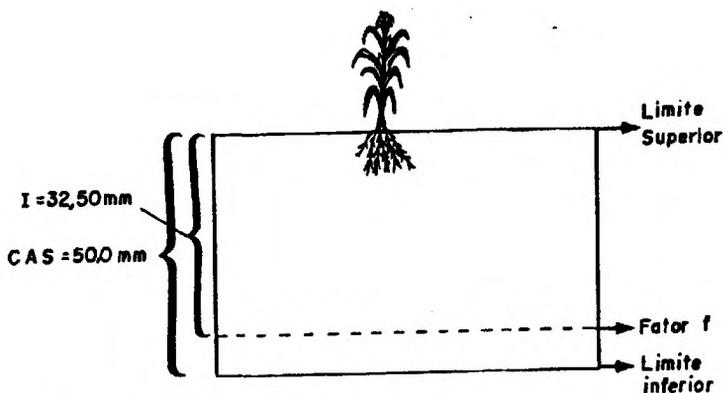


FIG. 8. Esquema ilustrativo do balanço de água no solo

4. REFERÊNCIAS

- ABOUKHALED, A. **Los lisímetros**. Roma: FAO, 1986. 60p. (FAO. Riego y Drenaje, 39).
- ALLEN, R.G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.112, n.4, p.348-368, 1986.
- ALLEN, R. G., JENSEN, M. E., WRIGHT, J. L., BURMAN R. D. Operacional estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p.650-662, 1989.
- ANDREATTA, J.A. **Determinação da razão entre a evapotranspiração máxima de dois cultivares de milho (*Zea mays* L.) e a evapotranspiração potencial**. Botucatu: UNESP, 1990. 93p. Dissertação Mestrado.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 4 ed. Viçosa: UFV/Imp. Univ., 1986. 488p.

BERNARDO, S. Manejo racional de irrigação. **ITEM**, Brasília, n.36, p.25-27, 1989.

DANIELSON, R.E. Root systems in relation to irrigation. In: HAGAN, R.M., HAISE, H.D., EDMINSTER, T.W. ed. **Irrigation of agricultural lands**. Madison: American Society of Agronomy, 1967. p.390-413.

DENMEAD, O.T., SHAW, R.H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v.54, p.385-390, 1962.

DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirement**. Roma: FAO, 1975. 144p. (FAO Irrigation and Drainage, 24).

DOORENBOS, J., KASSAN, A.H. **Yield response to water**. Roma: FAO, 1979. 193p. (FAO Irrigation and Drainage, 33).

EKERN, P.C., ROBINS, J.S., STAPLE, W.J. Soil and cultural factors affecting evapotranspiration. In: HAGAN, R.M., MAISE, H.R., EDMINSTER, T.W. ed. **Irrigation of agricultural lands**. Madison: American Society Agronomy, 1967. p.522-527.

FARQUHAR, G. D., SHARKEY, T. D. Stomatal conductance and photosynthesis. **Annual of Review Plant Physiology**, Palo Alto, v. 33, p.317-345, 1982.

- FERERES, E., KITLAS, P.M., GOLDFIEN, R.E., PRUITT, W.O., HAGAN, R.M. Simplified but scientific irrigation scheduling. **California Agriculture**, may-june. p.19-21, 1981.
- GATES, O.M., HANKS, R.J. Plants factores affecting evapotranspiration. In: HAGAN, R.M., HAISE, H.M., EDMINSTER, W.T. ed. **Irrigation of agricultural lands**. Madison: American Society of Agronomy, 1967. p.506-519.
- KLAR, A.E. **A influência do solo e do clima nas necessidades hídricas da cultura de cebola**. Botucatu: F.C.M.B.B. 1974. 171p. Tese Livre - Docência.
- KRAMER, P.J. **Plant soil water relationships: a modern synthesis**. New York: McGraw-Hill, 1969. 345p.
- MANSFIELD, T. A., DAVIES, W. J. Mechanisms for leaf control of gas exchange. **Bioscience**, Washington, v.35, n.3, p.158-164, 1985.
- MAROUELLI, W.A., SILVA, H.R., SILVA, W.L.C. **Manejo da irrigação em hortaliças**. Brasília: Embrapa-CNPQ, 1989.10p. (Embrapa-CNPQ. **Circular Técnica**, 2).
- MILLAR, A.A. **Manejo racional da irrigação: uso de informações básicas sobre diferentes culturas**. Brasília: IICA, 1984. 57p.
- PENMAN, H.L., ANGUS, D.E., VANGABEL, C.H.M. Microclimatic factors affecting evaporation and transpirations. In: HAGAN, R.M., HAISE, W.R., EDMINSTER, T.W. (ed). **Irrigation of agricultural lands**. Madison: American Society of Agronomy, 1967. p.483-503.

- PETERS, D.B., RUNKLES, J.R. Shoot and root growth as affected by water availability. In: HAGAN, R.M., HAISE, W.R., EDMINSTER, T.W. ed. **Irrigation of agricultural lands**. Madison: American Society of Agronomy, 1967. p.373-386.
- RAPOSO, J.R. **A rega por aspersão**. Lisboa: Clássica, 1980. 339p.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4 ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 466p.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 181p.
- RESENDE, M. Manejo de irrigação. In: CURSO DE USO E MANEJO DE IRRIGAÇÃO, 3, 1987, Sete Lagoas - MG. **Apostila...** Sete Lagoas: Embrapa/CNPMS, 1987. p.1-36.
- SCHULZE, E.-D. Carbon dioxide and water vapor exchange in response to drought in the atmosphere in the soil. **Annual Review Plant Physiology**, Palo Alto, v. 37, p. 247-274, 1986.
- SEDIYAMA, G.C., BERNARDO, S. Estudo de métodos para estimativa da evapotranspiração em Viçosa. **Experimentiae**, Viçosa, v.16, n.4, p.61-79, 1973.
- SEDIYAMA, G.C. Necessidade de água para os cultivos. In: CURSO DE ENGENHARIA DE IRRIGAÇÃO, 4, 1988, Brasília. **Apostila...** Brasília: ABEAS, 1988. p.238-249.
- SMITH, M., SEREGEN, A., PEREIRA, L. S., ALLEN, R. G. **Report on the expert consultation on procedures for revision of crop water requirements**. Roma: FAO, 1991. 45p.

TANNER, C.B. Measurement of evapotranspiration. In: HAGAN, R.M., HAISE, H.R., EDMINSTER, T.W. éd. **Irrigation of agricultural lands**. Madison: American Society of Agronomy, 1967. p.534-555.