


DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA FINS DE IRRIGAÇÃO



Luis Fernando Stone
Pedro Marques da Silveira

Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária
 **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA**
Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão - CNPAF
Goiânia, GO

DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA FINS DE IRRIGAÇÃO

Luis Fernando Stone
Pedro Marques da Silveira

Goiânia, GO
1995

EMBRAPA-CNPAF. Documentos, 55.

Comitê de Publicações

Pedro Antonio Arraes Pereira (Presidente)

Elza Jacqueline L. Meireles

Engler José Vidigal Lobato (Universidade Federal de Goiás)

Editoração e Programação Visual

Marina Biava (Coordenação)

Fabiano Severino

Sebastião José de Araújo

Sinábio de Sena Ferreira

Normalização Bibliográfica

Ana Lúcia D. de Faria

Exemplares desta publicação devem ser solicitados ao:

Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão - CNPAF

Rodovia GYN 12, km 10

Caixa Postal 179

Telefone (062) 212.1999

Fax (062) 212.2960

Telex 62-2241 EBPA

74001-970 Goiânia, GO

Tiragem: 1.000 exemplares.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. da. **Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação.** Goiânia: EMBRAPA-CNPAF, 1995. 49p. (EMBRAPA-CNPAF. Documentos, 55).

ISSN 0101-9716.

1. Evapotranspiração. 2. Irrigação. I. SILVEIRA, P. M. da, colab.
II. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (Goiânia, GO).
III. Título. IV. Série.

CDD 551.572

© EMBRAPA, 1995.

APRESENTAÇÃO

A demanda evaporativa da atmosfera é o fator que, em última instância, desencadeia o fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera. Ela determina a magnitude da perda de água por evapotranspiração e, conseqüentemente, a quantidade da água que as plantas necessitam absorver. Esta quantidade, na ausência da precipitação pluvial, deve ser suprida pela irrigação. Deduz-se, portanto, que o conhecimento da evapotranspiração das culturas é imprescindível para as atividades de planejamento e manejo do suprimento de água na agricultura irrigada.

Esta publicação apresenta métodos diretos e indiretos de determinação da evapotranspiração, e será de utilidade para os agentes de assistência técnica e para os produtores no planejamento e na condução da irrigação.

Homero Aidar
Chefe do CNPAF

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| APRESENTAÇÃO | 3 |
| 1. INTRODUÇÃO | 7 |
| 2. CONCEITOS BÁSICOS | 9 |
| 3. FATORES QUE INFLUENCIAM A EVAPOTRANSPIRAÇÃO | |
| 3.1. EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL | 10 |
| 3.2. EVAPOTRANSPIRAÇÃO ATUAL | 11 |
| 4. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO | |
| 4.1. MÉTODOS DIRETOS | 14 |
| 4.1.1. Balanço Hídrico de Campo | 14 |
| 4.1.2. Lisímetros | 16 |
| 4.1.3. Balanço de Energia | 18 |
| 4.2. MÉTODOS INDIRETOS | 19 |
| 4.2.1. Evaporímetros | 19 |
| 4.2.2. Fórmulas | 22 |
| 5. COEFICIENTE DE CULTURA | 42 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 48 |

DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA FINS DE IRRIGAÇÃO

Luis Fernando Stone¹
Pedro Marques da Silveira¹

1. INTRODUÇÃO

Evapotranspiração é a perda combinada de água para a atmosfera, em forma de vapor, através dos processos de evaporação das superfícies e transpiração das plantas. O comportamento da evapotranspiração e de seus componentes, ao longo do ciclo de uma cultura de arroz irrigada por aspersão e de uma irrigada por inundação, é apresentado, sob a forma de gráfico, nas Figuras 1 e 2, respectivamente. Verifica-se que a transpiração aumenta com o desenvolvimento da cultura, atingindo valores máximos na fase de floração, quando as plantas cobrem totalmente o solo. No caso do arroz irrigado por aspersão, a evapotranspiração apresenta comportamento semelhante, devido a transpiração ser seu componente mais importante, uma vez que a evaporação do solo diminui com o desenvolvimento da cultura. No caso do arroz irrigado por inundação, a evapotranspiração no início do ciclo da cultura é, na sua maior parte, composta de evaporação da superfície da água, que é bem maior do que a evaporação do solo. À medida que a cultura cresce, a evaporação decresce e aumenta a transpiração do dossel, havendo uma certa compensação, de maneira que a evapotranspiração do arroz irrigado por inundação independe praticamente da fase de desenvolvimento da cultura.

A transferência da água, no estado de vapor, para a atmosfera constitui importante elo do ciclo hidrológico da natureza. A mudança de fase da água consome ou libera grande quantidade de energia. A passagem de líquido para vapor e vice-versa envolve cerca de 590 cal/g. Como o vapor é transportado na atmosfera, podendo condensar e precipitar à grande distância da sua origem, a mudança de fase de líquido para vapor representa o maior mecanismo para a redistribuição da energia em todo o globo (Berlato & Molion, 1981).

Informações quantitativas de evaporação e evapotranspiração são necessárias nos vários campos científicos que tratam dos numerosos problemas do manejo de água. Dados confiáveis de evaporação são exigidos para o planejamento, construção e operação de reservatórios e sistemas de irrigação e drenagem (Berlato & Molion, 1981).

¹ Pesquisador, Dr., EMBRAPA-Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (CNPAP), Bolsista do CNPq, Caixa Postal 179, 74001-970 Goiânia, GO.

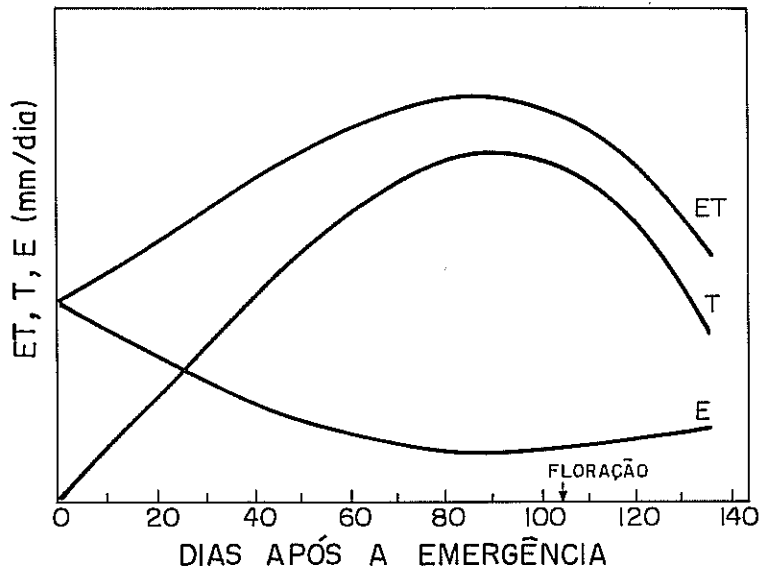


FIG. 1. Comportamento da evapotranspiração (ET), da evaporação (E) e da transpiração (T) ao longo do ciclo de uma cultura de arroz irrigada por aspersão.

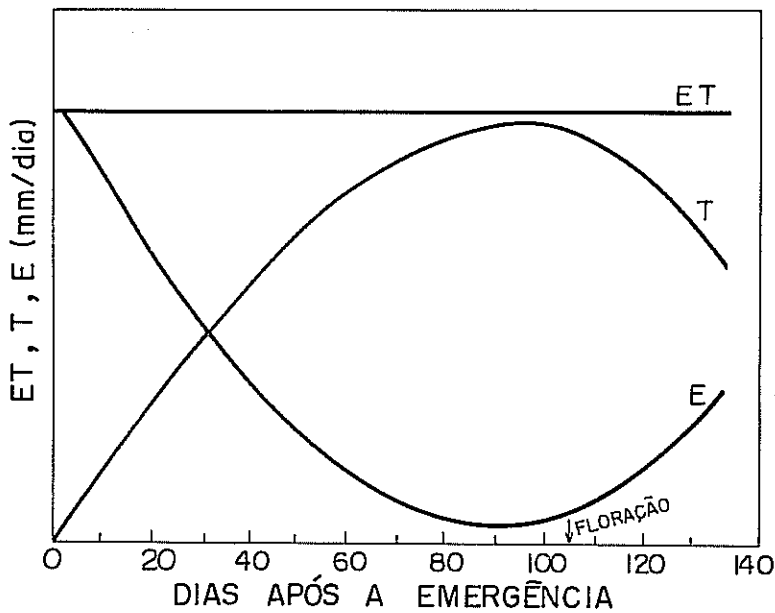


FIG. 2. Comportamento da evapotranspiração (ET), da evaporação (E) e da transpiração (T) ao longo do ciclo de uma cultura de arroz irrigada por inundação.

A evapotranspiração potencial, um dos principais componentes do balanço de água, é de grande utilidade em climatologia, quer em classificações climáticas, quer para a quantificação das disponibilidades hídricas regionais através de seu cotejo com a precipitação e variação de água no solo (Berlato & Molion, 1981).

Na agricultura irrigada, o conhecimento da evapotranspiração máxima nos diferentes estádios de desenvolvimento das plantas cultivadas é fundamental para o planejamento e manejo da irrigação. Na agricultura não irrigada, essa informação também é útil na adoção de práticas culturais que permitam o melhor aproveitamento das disponibilidades hídricas naturais de cada região, especialmente o ajustamento de épocas de semeadura, de modo que os períodos críticos de deficiência hídrica não coincidam com aqueles de menor disponibilidade de água no solo. Além disso, esse conhecimento é importante para programas de regionalização de cultivares e para estimar o potencial de rendimento, baseando-se nas disponibilidades hídricas das diferentes regiões agroclimáticas (Matzenauer, 1990).

2. CONCEITOS BÁSICOS

. **Evapotranspiração potencial (ET_p)** - o total de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, por unidade de tempo, de uma superfície extensa e completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água (definição de Penman, em 1956).

. **Evapotranspiração de referência (ET_o)** - evapotranspiração ocorrente em uma superfície vegetada com grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé), bem provida de água, em fase de desenvolvimento ativo e com a bordadura adequada.

. **Evapotranspiração máxima (ET_m)** - perda de água para a atmosfera por evaporação e transpiração de uma cultura em condições ótimas de densidade de plantas, fertilidade e disponibilidade de água no solo, com determinada bordadura e condições atmosféricas típicas, em qualquer estádio de desenvolvimento.

. **Evapotranspiração atual ou real (ET_a)** - perda de água para a atmosfera por evaporação e transpiração de uma cultura, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo, em qualquer estádio de desenvolvimento. A ET_a é menor ou igual a ET_m .

. **Uso consuntivo (U_c)** - a quantidade de água transpirada pelas plantas, mais a evaporada do solo e mais a retida nos tecidos vegetais. Como a água retida pela atividade metabólica dos vegetais é da ordem de 1% do total da água absorvida pela planta, considera-se, na prática, o uso consuntivo igual a evapotranspiração.

3. FATORES QUE INFLUENCIAM A EVAPOTRANSPIRAÇÃO

3.1. EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

Em condições ótimas de disponibilidade de água no solo, a ET_p seria apenas uma função das condições meteorológicas e do tipo de vegetação.

A evapotranspiração é, fundamentalmente, um processo dependente da energia disponível para a mudança do estado físico da água, sendo a radiação solar, portanto, o fator climático mais importante. A energia pode ser suprida para a cultura pela radiação solar e pela energia advectiva. Em regiões úmidas, a radiação compreende a maior parte do calor suprido para as plantas, enquanto em climas áridos, o efeito da advecção tem maior influência.

A temperatura do ar está estreitamente associada à radiação solar e, assim, também correlaciona-se positivamente com a evaporação. Um aumento na temperatura do ar influi favoravelmente na intensidade de evaporação, porque torna maior a quantidade de vapor d'água que pode estar presente no mesmo volume de ar, ao se atingir o grau de saturação deste. Isto ocorre porque o fluxo de vapor de água para a atmosfera é diretamente proporcional ao déficit de saturação ($e_s - e$), onde e_s é a pressão de saturação do vapor d'água e e a pressão atual do vapor d'água. Por conseguinte, a taxa de evaporação será tanto maior quanto maior for o déficit de saturação entre a camada saturada e o ar externo. Como já mencionado, o aumento na temperatura do ar aumenta e_s , intensificando o déficit de saturação e, conseqüentemente, a evaporação.

Com a umidade relativa do ar ocorre o oposto. Com o seu aumento, o déficit de saturação diminui, pois o valor de e aumenta e a intensidade de evaporação diminui.

O efeito do vento na evaporação é exercido pela remoção e renovação do ar logo acima da superfície evaporante. Normalmente, o vento retira da camada acima da superfície evaporante o ar saturado ou próximo à saturação, ficando mais seco o ar sobre a mesma superfície, o que determina a manutenção do processo evaporativo. A relação entre o vento e a evaporação é, entretanto, limitada. Acima de uma determinada velocidade, a evaporação torna-se independente da velocidade do vento.

O controle exercido pela vegetação seria através de sua estrutura, afetando o albedo (coeficiente de reflexão para radiação de onda curta), a rugosidade aerodinâmica, a cobertura do solo, bem como o sistema radicular (Berlato & Molion, 1981).

A variação do albedo acarreta uma variação do balanço de energia da superfície evaporante e, conseqüentemente, uma variação da perda de água pelas plantas para a atmosfera. Conforme dados de Chang (1968), as principais culturas agrícolas têm um albedo máximo de aproximadamente 0,25. Para florestas com cobertura foliar permanente durante o ano, os albedos são normalmente menores.

Segundo Ward (1975), as florestas de coníferas podem ter um albedo tão baixo quanto 0,15 ou 0,10. A emissão de ondas longas por vegetação rugosa como a das florestas também é menor do que a das culturas agrícolas (Sharma, 1985).

Penman, citado por Chang (1968), argumentou que, quando a cobertura do solo é completa, a evapotranspiração potencial é determinada principalmente pelos elementos meteorológicos, não sendo afetada pelas espécies de planta.

Tanner (1967), ainda que reconhecendo as possíveis diferenças na ET_p , devido à estrutura da vegetação, declarou que, para muitos tipos de vegetação, baixa ou alta, mas cobrindo completamente o solo e sem deficiência de água, a evapotranspiração potencial não é muito diferente. Afirma, entretanto, que grandes diferenças podem ser observadas entre uma cultura e outra em períodos curtos de tempo. Admitindo um albedo menor para florestas, a simples consideração do balanço de energia levaria a um saldo de radiação maior sobre as florestas e, conseqüentemente, a um aumento da evapotranspiração. Entretanto, se o "controle" exercido pela vegetação, nas condições estabelecidas para ET_p , não for tão significativo, especialmente em culturas agrícolas, a evapotranspiração potencial passa, então, a ser função quase exclusiva das condições meteorológicas.

O conceito de que a ET_p é função quase exclusiva das variáveis meteorológicas é um conceito prático, pois permite que esse parâmetro seja estimado através de dados meteorológicos. Isso, entretanto, não elimina a necessidade de calibração das fórmulas ou métodos empíricos de determinação da ET_p para as diversas culturas, pois sabe-se hoje que a ET_p de várias comunidades de plantas pode diferir consideravelmente, principalmente por causa de variações no albedo (afetando a radiação líquida), na rugosidade aerodinâmica (afetando a transferência de vapor), e na condutividade e capacidade termal (afetando o fluxo de calor do dossel e do solo).

3.2. EVAPOTRANSPIRAÇÃO ATUAL

À medida que a umidade do solo decresce, a Et_a passa a ser menor do que a Et_p . Várias teorias e métodos foram propostos para relacionar a disponibilidade de água no solo e a razão Et_a/ET_p , cinco dos quais, adaptados de Tanner (1967), estão representados na Figura 3.

Pela Figura 3, de acordo com a teoria de Veihmeyer & Hendrickson (Curva 1), a Et_a se mantém ao nível da ET_p ($Et_a/ET_p = 1$) desde a capacidade de campo (-0,03 MPa) até o ponto de murcha permanente (-1,5 MPa). Por outro lado, Thornthwaite & Mather (Curva 2) admitem uma relação linear entre decréscimo de umidade do solo e decréscimo de Et_a/ET_p . Já Havens (Curva 3) adota a relação linear, como Thornthwaite & Mather, admitindo, entretanto, que a Et_a/ET_p cai a zero somente quando o solo apresenta potencial matricial acima do ponto de murcha permanente (< -1,5 Mpa). Na Curva 4, concebida por Pierce, a evapotranspiração se mantém ao nível da potencial por algum tempo, depois que a quantidade de água do

solo baixou da capacidade de campo, decrescendo rapidamente após. Conforme vários autores, uma relação como a representada pela Curva 5 seria a melhor aproximação (Penman, Marlatt et al., Holmes & Robertson, citados por Tanner, 1967).

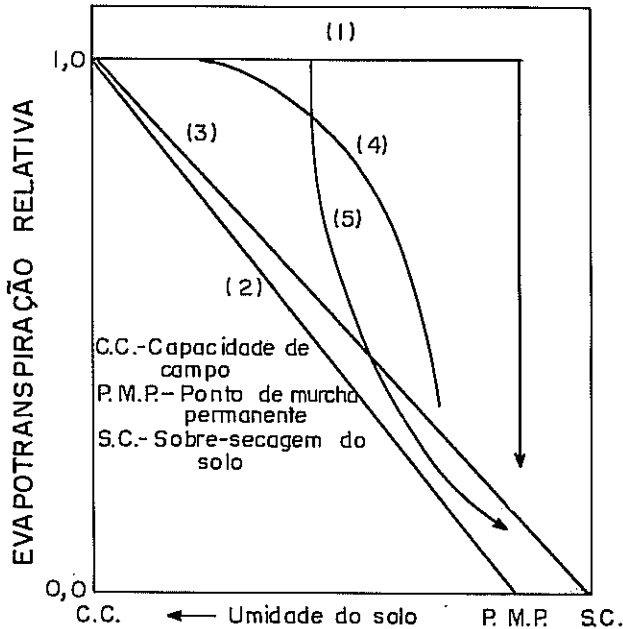


FIG. 3. Relações propostas entre a evapotranspiração relativa (evapotranspiração atual/evapotranspiração potencial) e a umidade do solo: (1) Veihmeyer & Hendrickson; (2) Thornthwaite & Mather; (3) Havens; (4) Pierce; e (5) Penman, Marlatt et al., Holmes & Robertson. Adaptado de Tanner (1967).

Segundo Chang (1968), estes dados conflitantes não são devidos a erros experimentais, mas às diferentes condições em que foram realizados os experimentos. Em realidade, nenhum desses trabalhos levou em consideração o conjunto de fatores que afetam o regime hídrico do sistema solo-planta-atmosfera.

Sabe-se, hoje, que a relação entre a taxa de evapotranspiração e a tensão de água do solo depende de outros fatores, como a textura e condutividade hidráulica do solo, profundidade e desenvolvimento do sistema radicular, densidade da vegetação e condições atmosféricas. Provavelmente, o fator que exerce maior influência é a demanda evaporativa da atmosfera (Berlato & Molion, 1981). Denmead & Shaw (1962) apresentaram resultados experimentais que esclarecem um pouco mais a questão. Trabalhando com milho, em Iowa, Estados Unidos, esses

autores determinaram a taxa de transpiração em função da umidade do solo, para três condições atmosféricas diferentes (Figura 4). Nesta figura, a Curva A representa a relação encontrada para um dia nublado e com umidade do ar elevada (transpiração potencial baixa). Nestas condições, a transpiração real manteve-se ao nível da potencial até bem próximo do ponto de murcha permanente (-1,5 MPa), mostrando que, com baixa demanda evaporativa da atmosfera, a planta consegue retirar a água que necessita, mesmo quando esta não é abundante no solo. Para este caso especificamente, a teoria de Veihmeyer & Hendrickson é adequada. A Curva B representa uma situação oposta, um dia claro e seco (alta demanda evaporativa da atmosfera = alta evapotranspiração potencial). Nestas condições, a transpiração real, ou evapotranspiração real, torna-se menor que a potencial ($ET_r/ET_p < 1$) tão logo a umidade do solo se afasta da capacidade de campo, situação algo semelhante à Curva 5 da Figura 3. A Curva C representa uma condição de demanda evaporativa intermediária entre as outras duas.

Na Figura 5 é apresentado, para a cultura do arroz, um exemplo do efeito da demanda evaporativa da atmosfera sobre a relação ET_r/ET_p . Observa-se que, para valores de ET_p inferiores a 3 mm/dia, esta relação é igual à unidade até quando o solo possui 50% da sua água disponível. Quando, porém, a taxa de demanda da atmosfera é superior a 5mm/dia, a relação ET_r/ET_p torna-se inferior à unidade quando o teor de água no solo corresponde a 80% da água disponível.

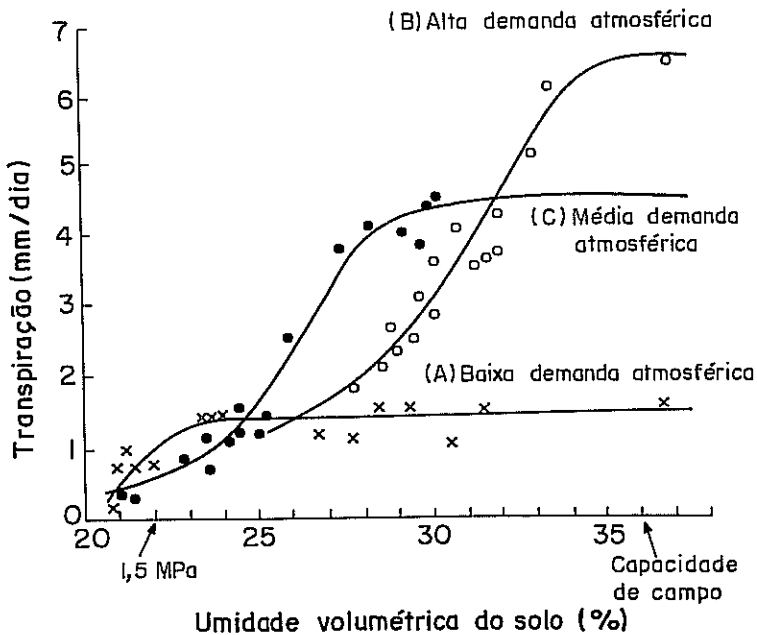


FIG. 4. Transpiração do milho em função da umidade do solo e da demanda evaporativa da atmosfera. Adaptado de Denmead & Shaw (1962).

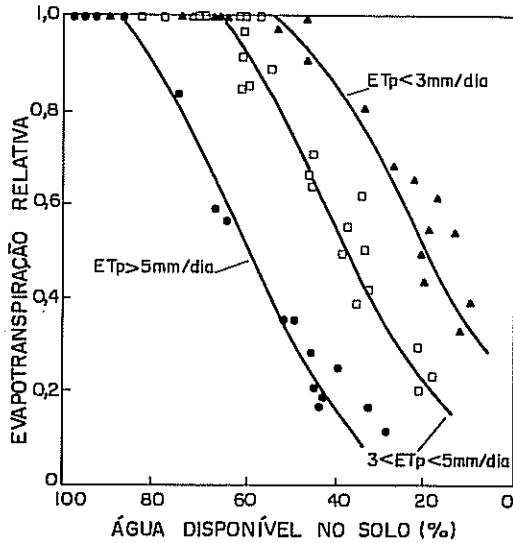


FIG. 5. Relação entre a evapotranspiração relativa (evapotranspiração atual/evapotranspiração potencial) e a porcentagem de água disponível no solo para a cultura do arroz de sequeiro. Adaptado de Brunini et al. (1981).

4. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração pode ser obtida por meio de medições diretas ou através de estimativas.

4.1. MÉTODOS DIRETOS

Dentre os métodos diretos de determinação da evapotranspiração, citam-se o balanço hídrico de campo, o uso de lisímetros e o balanço de energia, os quais são utilizados, normalmente, para a medição da evapotranspiração em nível experimental, com a utilização de instrumentos e do manejo necessário.

4.1.1. Balanço Hídrico de Campo

Este método baseia-se no princípio da conservação de massa. A equação geral é dada por:

$$P + I - ET \pm R \pm D \pm \Delta A \pm \Delta V = 0 \quad (1)$$

sendo: P = precipitação pluvial; I = irrigação; ET = evapotranspiração; R = escoamento superficial; D = drenagem profunda ou ascensão capilar; ΔA = variação no armazenamento de água no solo; e ΔV = variação no armazenamento de água na planta. Em geral, a variação no conteúdo de água na planta, por ser muito pequena, é desconsiderada.

Assim, a evapotranspiração é determinada por:

$$ET = P + I \pm R \pm D \pm \Delta A \quad (2)$$

Para se fazer o balanço hídrico, normalmente escolhem-se áreas planas de maneira que o escoamento superficial possa ser desconsiderado. Caso contrário, ele pode ser medido por meio de parcelas de escoamento. A precipitação é medida por pluviômetro e a irrigação por coletores instalados no local. O armazenamento de água no perfil do solo é calculado integrando valores de umidade do solo, em cm^3/cm^3 , até a profundidade do solo considerada para o balanço. A sua variação em um intervalo de tempo é ΔA . A drenagem pode ser estimada com base na equação de Buckingham-Darcy, que descreve o fluxo de água em um perfil de solo:

$$D = K(\theta) \left[\frac{\partial \Psi_h}{\partial z} \right]_z \quad (3)$$

onde $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica do solo e $\left[\frac{\partial \Psi_h}{\partial z} \right]_z$ é o gradiente de potencial hidráulico da água do solo. A condutividade hidráulica pode ser determinada por vários métodos, como o de Hillel et al. (1972), e o gradiente de potencial pode ser obtido por meio de tensiômetros.

Devido à dificuldade de se medir a drenagem profunda, algumas vezes ela é desconsiderada, principalmente quando é utilizada a irrigação. Partindo-se do pressuposto que a irrigação é feita para preencher a deficiência de água de um solo até a capacidade de campo, praticamente não se teria drenagem. Entretanto, o processo de drenagem após uma irrigação pode ocorrer por muitos dias, mesmo a taxas reduzidas gradualmente com o tempo. Assim, dependendo das circunstâncias, a sua exclusão do balanço hídrico pode ser uma fonte de erro representativa. Silveira & Stone (1979), utilizando o método do balanço hídrico para determinar a evapotranspiração do feijoeiro, verificaram que a drenagem profunda correspondeu a 18% da ET_n .

Algumas precauções são necessárias para que os dados obtidos tornem-se mais confiáveis, tais como:

- . os locais de amostragem do solo devem ser representativos da área;
- . o lençol freático deve estar muito abaixo da profundidade atingida pelo sistema radicular;

- . fazer as medidas em períodos secos ou quando a precipitação for pequena;
- . no caso de culturas irrigadas, aplicar menos água do que a quantidade que pode ser retida pelo solo;
- . para medições, utilizar, no mínimo, a profundidade efetiva da zona radicular.

4.1.2. Lisímetros

Conforme o tipo de manejo dado ao termo de variação de armazenamento de água no solo (ΔA) da equação de conservação de massa, os lisímetros são agrupados em dois tipos básicos: lisímetros de pesagem e lisímetros de não-pesagem.

4.1.2.1. Lisímetros de pesagem

São tanques enterrados, cheios de solo, vegetados, suportados por um mecanismo de balança que permite o acompanhamento da variação no peso do lisímetro em intervalos de tempo compatíveis com a resolução da balança. Entre outras, as balanças podem ser mecânicas, eletrônicas, células hidráulicas, flutuadores. A variação de peso corresponde à variação no armazenamento de água no solo.

$$ET_m \text{ ou } ET_n = \Delta P/S \quad (4)$$

onde: ET_m ou ET_n = evapotranspiração máxima ou atual, em mm; ΔP = variação do peso do tanque, em kg; e S = área do tanque, em m^2 .

Com este instrumento, o mais exato para a determinação direta da evapotranspiração, podem ser obtidas medidas precisas para curtos intervalos de tempo para realizar estudos detalhados com a variação diária da evapotranspiração. Entretanto, devido ao custo de instalação e cuidados de operação, é indicado apenas para pesquisa e como padrão para calibração de outros métodos de estimativa da evapotranspiração.

4.1.2.2. Lisímetros de não-pesagem

Existe uma série bastante grande de lisímetros incluídos na categoria dos de não-pesagem, dentre os quais podem ser citados: lisímetro de compensação com lençol d'água superficial, lisímetro de compensação com nível d'água no solo constante e lisímetro de drenagem com seus vários tipos especiais.

Os lisímetros de drenagem, também chamados de evapotranspirômetros, são tanques enterrados, cheios de solo e vegetados. Um sistema de drenagem no fundo do tanque permite que a quantidade de água que exceda a capacidade de retenção do

solo percole e seja conduzida a um poço coletor para ser medida. O lisímetro de drenagem mais conhecido é o de Thornthwaite-Mather.

Nos lisímetros de não-pesagem, o termo de variação no armazenamento é desconsiderado através do emprego de técnicas que permitam sua desconsideração.

São geralmente utilizados para medir a ET_m , ou seja, nesses tanques a umidade do solo é mantida à capacidade de campo.

$$ET_m = P + \frac{I - D}{S} \quad (5)$$

onde: ET_m = evapotranspiração máxima, em mm; P = precipitação pluvial, em mm; I = irrigação no tanque, em l; D = água drenada do tanque, em l; e S = área do tanque, em m^2 .

A ET_m deve ser determinada em médias semanais, quinzenais ou mensais. Dado que o movimento d'água no solo ocorre de forma relativamente lenta, os lisímetros de drenagem somente têm precisão para períodos mais ou menos longos. Eles precisam ser irrigados a cada quatro ou cinco dias com uma quantidade d'água tal que a água percolada seja em torno de 10% do total aplicado nas irrigações.

Entre os vários lisímetros, os de drenagem, certamente, são os que vêm sendo mais largamente utilizados, por serem mais simples e baratos que os demais e poderem fornecer dados de evapotranspiração com precisão aceitável, quando bem instalados e operados.

4.1.2.3. Requisitos para obtenção de medidas confiáveis com lisímetros (Berlato & Molion, 1981)

- . O tamanho do tanque deve ser suficiente para minimizar o efeito da parede e não restringir o desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Em geral, é recomendado um tanque com um mínimo de 2,0 m de diâmetro e 1,5 m de profundidade. Para plantas com sistema radicular raso, o tanque pode ser menor.

- . A estrutura do solo no tanque deve se aproximar, tanto quanto possível, da estrutura natural. Para solos arenosos e solos francos, homogêneos, isso pode ser obtido com razoável sucesso através da colocação das camadas de solo (horizontes) na mesma ordem que aparecem no perfil natural.

- . O solo dentro e fora do tanque deve ficar no mesmo nível. Também o preparo do solo, dentro e fora, deve ser realizado ao mesmo tempo e com a mesma intensidade.

- . A densidade de plantas e o espaçamento dentro e fora do tanque devem ser iguais, bem como o regime de umidade do solo.

- . Para minimizar o efeito da advecção, os tanques evapotranspirométricos devem ter ao seu redor uma área mantida nas mesmas condições de vegetação (tipo de planta, densidade e espaçamento) e umidade do solo. O tamanho dessa área varia conforme

as condições climáticas. Em regiões de forte advecção, como nos climas semi-áridos, uma área de 4 ha pode não ser suficientemente grande.

. Os tanques devem ser construídos com material mau condutor de calor, podendo ser utilizados fibra de vidro ou cimento-amianto. No Brasil, alguns evapotranspirômetros tipo Thornthwaite-Mather têm sido montados com caixas de cimento-amianto disponíveis no comércio. As formas circulares são preferíveis, pois para a mesma área apresentam menor perímetro, o que diminui o efeito de parede.

. Se o objetivo é medir a evapotranspiração máxima, então a umidade do solo, dentro e fora do tanque deve ser mantida à capacidade de campo.

4.1.3. Balanço de Energia

Este método é fundamentado no princípio físico da conservação de energia, ou seja, o ganho de energia é igual à perda. O balanço de energia vertical na superfície pode ser apresentado como:

$$R_n = LE + H + S \quad (6)$$

onde: R_n = energia disponível na superfície (saldo de radiação); LE = fluxo de energia equivalente à evapotranspiração ou fluxo de calor latente; H = fluxo vertical de calor sensível para o ar (aquecimento do ar); e S = fluxo de calor para o meio (aquecimento do solo).

R_n pode ser medido com um instrumento denominado saldo-radiômetro e S com placas medidoras de fluxo de calor no solo. LE e H necessitam ser estimados. Esta estimativa é feita medindo-se, de forma muito precisa, os gradientes de temperatura e de umidade acima da superfície vegetada, usando a razão de Bowen (B), a qual relaciona os termos H e LE , dada por:

$$B = H/LE \quad (7)$$

Substituindo (7) em (6) e rearranjando os termos, tem-se:

$$LE = \frac{R_n - S}{1 + B} \quad (8)$$

onde B pode ser calculado por:

$$B = \left[\left(\frac{\Delta}{\gamma} + 1 \right) \left(\frac{\Delta T_u}{\Delta T} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (9)$$

sendo: Δ = tangente a curva de saturação do vapor d'água, no ponto médio da temperatura úmida entre dois níveis; γ = constante psicrométrica; e ΔT e ΔT_u = as diferenças de temperatura medidas nos termômetros de bulbo seco e bulbo úmido, respectivamente, entre dois níveis. A relação Δ/γ pode ser encontrada em tabelas, em função da temperatura (Tabela 1). Os dois níveis considerados para medida de ΔT_u e ΔT são inferiores (10 a 20 cm acima do nível da maior densidade foliar) e superiores (mesma distância acima do inferior).

O método do balanço de energia possibilita medir a evapotranspiração em períodos curtos, como um dia, por exemplo. A instrumentação necessária e a técnica envolvida nas medições têm, entretanto, limitado o uso do método a trabalhos de pesquisa. Sua precisão é maior quando as medições são feitas no centro de uma área tampão, grande o suficiente para eliminar o efeito oásis. A energia advectiva constitui um problema sério à medida que o clima se torna mais seco. Nos climas temperados úmidos, o fluxo de energia consumido na evapotranspiração (LE) é menor que o saldo da radiação (Rn). Nos climas áridos, contudo, a advecção do calor sensível representa uma nova fonte de energia para a evapotranspiração, resultando na possibilidade de, nestas circunstâncias, LE ser maior do que Rn.

4.2. MÉTODOS INDIRETOS

A evapotranspiração é estimada por esses métodos através de fórmulas empíricas ou baseadas em princípios físico-fisiológicos, ou mesmo pela utilização de instrumentos para medição da evaporação da água (evaporímetros).

4.2.1. Evaporímetros

Estes equipamentos medem a evaporação d'água, correlacionando-a à evapotranspiração, através de coeficientes. Existem dois tipos básicos de evaporímetros: um em que a superfície d'água fica livremente exposta (tanques de evaporação) e outro em que a evaporação se dá através de uma superfície porosa (atmômetros).

De modo geral, para se calcular a ET, os evaporímetros são mais precisos e mais sensíveis em períodos curtos, se comparados às fórmulas.

4.2.1.1. Tanques de evaporação

Existem vários tipos de tanques de evaporação, a maioria regionais. Alguns, devido ao uso freqüente, tornam-se quase internacionais. Descreve-se, a seguir, o mais usado, o tanque USWB Classe A.

TABELA 1. Valores de Δ/γ , adimensionais, conforme a temperatura (T), em °C.

| T | Δ/γ | T | Δ/γ | T | Δ/γ | T | Δ/γ | T | Δ/γ |
|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|
| 0,0 | 0,67 | 10,0 | 1,23 | 20,0 | 2,14 | 30,0 | 3,57 | 40,0 | 5,70 |
| 0,5 | 0,69 | 10,5 | 1,27 | 20,5 | 2,20 | 30,5 | 3,66 | 40,5 | 5,83 |
| 1,0 | 0,72 | 11,0 | 1,30 | 21,0 | 2,26 | 31,0 | 3,75 | 41,0 | 5,96 |
| 1,5 | 0,74 | 11,5 | 1,34 | 21,5 | 2,32 | 31,5 | 3,84 | 41,5 | 6,00 |
| 2,0 | 0,76 | 12,0 | 1,38 | 22,0 | 2,38 | 32,0 | 3,93 | 42,0 | 6,23 |
| 2,5 | 0,79 | 12,5 | 1,42 | 22,5 | 2,45 | 32,5 | 4,03 | 42,5 | 6,37 |
| 3,0 | 0,81 | 13,0 | 1,46 | 23,0 | 2,51 | 33,0 | 4,12 | 43,0 | 6,51 |
| 3,5 | 0,84 | 13,5 | 1,50 | 23,5 | 2,58 | 33,5 | 4,22 | 43,5 | 6,65 |
| 4,0 | 0,86 | 14,0 | 1,55 | 24,0 | 2,64 | 34,0 | 4,32 | 44,0 | 6,80 |
| 4,5 | 0,89 | 14,5 | 1,59 | 24,5 | 2,71 | 34,5 | 4,43 | 44,5 | 6,95 |
| 5,0 | 0,92 | 15,0 | 1,64 | 25,0 | 2,78 | 35,0 | 4,53 | 45,0 | 7,10 |
| 5,5 | 0,94 | 15,5 | 1,68 | 25,5 | 2,85 | 35,5 | 4,64 | 45,5 | 7,26 |
| 6,0 | 0,97 | 16,0 | 1,73 | 26,0 | 2,92 | 36,0 | 4,75 | 46,0 | 7,41 |
| 6,5 | 1,00 | 16,5 | 1,78 | 26,5 | 3,00 | 36,5 | 4,86 | 46,5 | 7,57 |
| 7,0 | 1,03 | 17,0 | 1,82 | 27,0 | 3,08 | 37,0 | 4,97 | 47,0 | 7,73 |
| 7,5 | 1,06 | 17,5 | 1,88 | 27,5 | 3,15 | 37,5 | 5,09 | 47,5 | 7,90 |
| 8,0 | 1,10 | 18,0 | 1,93 | 28,0 | 3,23 | 38,0 | 5,20 | 48,0 | 8,07 |
| 8,5 | 1,13 | 18,5 | 1,98 | 28,5 | 3,31 | 38,5 | 5,32 | 48,5 | 8,24 |
| 9,0 | 1,16 | 19,0 | 2,03 | 29,0 | 3,40 | 39,0 | 5,45 | 49,0 | 8,42 |
| 9,5 | 1,20 | 19,5 | 2,09 | 29,5 | 3,48 | 39,5 | 5,57 | 49,5 | 8,60 |
| 10,0 | 1,23 | 20,0 | 2,14 | 30,0 | 3,57 | 40,0 | 5,70 | 50,0 | 8,77 |

Fonte: Fontana (1990).

Esse tanque consiste de um recipiente circular, construído, normalmente, de aço galvanizado, com 1,21 m (47,5") de diâmetro interno e 25,4 cm (10") de profundidade. Deve ser instalado sobre um estrado de madeira de 10 cm de altura, e cheio d'água até que o seu nível fique a 5 cm da borda superior do tanque. A evaporação é medida com um micrômetro de gancho, assentado sobre um poço tranquilizador. Este poço pode ser de metal e com tripé sobre parafuso colocado dentro do tanque, ou um cilindro de 10 cm de diâmetro, que se comunica com o tanque através de um tubo. Este último tipo de poço tranquilizador tem vantagens sobre o primeiro, porque conduz menos calor. A oscilação máxima do nível d'água dentro do tanque deve ser de 2,5 cm.

Por meio da evaporação do tanque (ECA), estima-se a ET_0 pela multiplicação da ECA pelo coeficiente do tanque (K_p), que leva em conta o clima e o meio circundante ao tanque (Tabela 2).

TABELA 2. Coeficiente de correção (Kp) para o tanque Classe A.

| Vento (m/s) | Exposição A Tanque circundado por grama | | | | Exposição B Tanque circundado por solo nú | | | |
|--------------------|--|---------------|-----------------|--------------|--|---------------|-----------------|--------------|
| | Posição do tanque R*(m) | UR% (média) | | | Posição do tanque R*(m) | UR% (média) | | |
| | | Baixa <40% | Média 40-70% | Alta >70% | | Baixa <40% | Média 40-70% | Alta >70% |
| Leve < 2 | 1 | 0,55 | 0,65 | 0,75 | 1 | 0,70 | 0,80 | 0,85 |
| | 10 | 0,65 | 0,75 | 0,85 | 10 | 0,60 | 0,70 | 0,80 |
| | 100 | 0,70 | 0,80 | 0,85 | 100 | 0,55 | 0,65 | 0,75 |
| | 1000 | 0,75 | 0,85 | 0,85 | 1000 | 0,50 | 0,60 | 0,70 |
| Moderado 2-5 | 1 | 0,50 | 0,60 | 0,65 | 1 | 0,65 | 0,75 | 0,80 |
| | 10 | 0,60 | 0,70 | 0,75 | 10 | 0,55 | 0,65 | 0,70 |
| | 100 | 0,65 | 0,75 | 0,80 | 100 | 0,50 | 0,60 | 0,65 |
| | 1000 | 0,70 | 0,80 | 0,80 | 1000 | 0,45 | 0,55 | 0,60 |
| Forte 5-8 | 1 | 0,45 | 0,50 | 0,60 | 1 | 0,60 | 0,65 | 0,70 |
| | 10 | 0,65 | 0,60 | 0,65 | 10 | 0,50 | 0,55 | 0,75 |
| | 100 | 0,60 | 0,65 | 0,75 | 100 | 0,45 | 0,50 | 0,60 |
| | 1000 | 0,65 | 0,70 | 0,75 | 1000 | 0,40 | 0,45 | 0,55 |
| Muito Forte > 8 | 1 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 1 | 0,50 | 0,60 | 0,65 |
| | 10 | 0,45 | 0,55 | 0,60 | 10 | 0,45 | 0,50 | 0,55 |
| | 100 | 0,50 | 0,60 | 0,65 | 100 | 0,40 | 0,45 | 0,50 |
| | 1000 | 0,55 | 0,60 | 0,65 | 1000 | 0,35 | 0,40 | 0,45 |

* Por R, entende-se a menor distância do centro do tanque ao limite da bordadura.

Fonte: Doorenbos & Kassam (1979).

Nota : Para extensas áreas do solo nú, reduzir os valores de Kp de 20%, em condições de alta temperatura e vento forte, e de 10 a 5%, em condições de moderada temperatura, vento e umidade.

Vários trabalhos têm mostrado que, entre os métodos utilizados para estimativa da evapotranspiração potencial, o tanque Classe A é o mais preciso, prático e econômico. Isto se deve ao fato de que o tanque dá uma medida integrada dos efeitos da radiação, do vento, da temperatura e da umidade do ar, e as plantas respondem às mesmas variáveis. Apesar disto, deve-se considerar que outros fatores interferem, contribuindo para diferenças entre a evaporação do tanque e a das culturas (Withers & Vipond, 1974). Entre outras, citam-se:

. A não similaridade entre a refletância da cultura e a da superfície de água, sendo a desta última influenciada pela cor do tanque. A limpeza periódica do tanque para remover depósitos é um importante item de manutenção.

- . O perfil de vento sobre uma cultura difere daquele sobre o tanque. Em culturas que permitem o ar passar através delas ao invés de passar sobre elas, as folhas mais baixas podem transpirar uma grande quantidade de água. O uso de água pela cultura pode exceder a evaporação do tanque.
- . O armazenamento de calor no tanque pode ser considerável, e a temperatura alta da água aumenta a taxa de evaporação.
- . A evaporação do tanque continua a noite, mas a maioria das plantas fecha os estômatos no escuro. Uma distinção deveria ser feita entre evaporação diurna e noturna do tanque.
- . O tanque não oferece resistência estomática para a perda de umidade, portanto a evaporação do tanque deve ser estritamente correlacionada somente com a evapotranspiração potencial.

Apesar destas considerações, o tanque pode dar boa estimativa da perda de água das culturas, principalmente para períodos superiores a uma semana.

4.2.1.2. Atmômetros

Estes instrumentos são fáceis de instalar e operar. Podem apresentar erros em razão da impregnação de sal ou poeira em seus poros, principalmente nos de superfície porosa permanente. Outro grande problema dos atmômetros é que eles são mais sensíveis ao vento do que à radiação solar.

Entre os vários tipos de atmômetros, os principais são o evaporímetro de Piche e os atmômetros de Livingstone e Bellani. No Brasil, o mais utilizado é o evaporímetro de Piche, que consiste em um tubo de 22,5 cm de comprimento com 1,1 cm de diâmetro interno, graduado em décimo de milímetro e fechado em uma das extremidades. Na extremidade aberta do tubo, prende-se um disco de papel de 3,2 cm de diâmetro, por meio de um anel. É cheio d'água destilada e pendurado na vertical, com a extremidade fechada para cima. A evaporação se dá através do disco de papel, e a quantidade d'água evaporada é determinada pela variação do nível d'água no tubo (Bernardo, 1982).

Devido à sua alta sensibilidade ao meio circundante e às condições locais, as medições feitas com atmômetros são muito mais restritas ao seu local de instalação do que as feitas com tanques.

4.2.2. Fórmulas

Existe, atualmente, um grande número de fórmulas para calcular a evapotranspiração, algumas das quais de difícil aplicação na prática, não só pela complexidade do cálculo, como também por exigir grande número de elementos meteorológicos fornecidos somente por estações de primeira classe.

As fórmulas mais divulgadas são abordadas nos itens subseqüentes.

4.2.2.1. Fórmula de Thornthwaite

Thornthwaite determinou, em 1948, uma fórmula empírica para o cálculo da evapotranspiração potencial, cuja expressão é a seguinte:

$$ET_p = 16 D (10 T/I)^a \quad (10)$$

sendo: ET_p = evapotranspiração potencial, em mm/mês; D = fator de ajuste ao número de dias do mês e à duração do brilho solar diário (Tabela 3); T = temperatura média mensal do ar, em °C; e I = índice de calor anual, correspondente à soma dos 12 índices mensais « i ».

$$I = \sum_1^{12} i \quad (11)$$

$$i = (T/5)^{1,514} \quad (12)$$

a é uma função cúbica de I , determinada pela seguinte fórmula:

$$a = 0,675 \cdot 10^{-6} \cdot I^3 - 0,771 \cdot 10^{-4} \cdot I^2 + 1,792 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (13)$$

TABELA 3. Fator de ajuste (D) ao número de dias do mês e à duração do brilho solar diário, conforme a latitude e meses do ano.

| Lat.Sul | jan. | fev. | mar. | abr. | maio | jun. | jul. | ago. | set. | out. | nov. | dez. |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 5 | 1,06 | 0,95 | 1,04 | 1,00 | 1,02 | 0,99 | 1,02 | 1,03 | 1,00 | 1,05 | 1,03 | 1,06 |
| 10 | 1,08 | 0,97 | 1,05 | 0,99 | 1,01 | 0,96 | 1,00 | 1,01 | 1,00 | 1,06 | 1,05 | 1,10 |
| 15 | 1,12 | 0,98 | 1,05 | 0,98 | 0,98 | 0,94 | 0,97 | 1,00 | 1,00 | 1,07 | 1,07 | 1,12 |
| 20 | 1,14 | 1,00 | 1,05 | 0,97 | 0,96 | 0,91 | 0,95 | 0,99 | 1,00 | 1,08 | 1,09 | 1,15 |
| 22 | 1,14 | 1,00 | 1,05 | 0,97 | 0,95 | 0,90 | 0,94 | 0,99 | 1,00 | 1,09 | 1,10 | 1,16 |
| 23 | 1,15 | 1,00 | 1,05 | 0,97 | 0,95 | 0,89 | 0,94 | 0,98 | 1,00 | 1,09 | 1,10 | 1,17 |
| 24 | 1,16 | 1,01 | 1,05 | 0,96 | 0,94 | 0,89 | 0,93 | 0,98 | 1,00 | 1,10 | 1,11 | 1,17 |
| 25 | 1,17 | 1,01 | 1,05 | 0,96 | 0,94 | 0,88 | 0,92 | 0,98 | 1,00 | 1,10 | 1,11 | 1,18 |
| 26 | 1,17 | 1,01 | 1,05 | 0,96 | 0,94 | 0,87 | 0,92 | 0,98 | 1,00 | 1,10 | 1,11 | 1,18 |
| 27 | 1,18 | 1,02 | 1,05 | 0,96 | 0,93 | 0,87 | 0,92 | 0,97 | 1,00 | 1,11 | 1,12 | 1,19 |
| 28 | 1,19 | 1,02 | 1,06 | 0,95 | 0,93 | 0,86 | 0,91 | 0,97 | 1,00 | 1,11 | 1,13 | 1,20 |
| 29 | 1,19 | 1,03 | 1,06 | 0,95 | 0,92 | 0,86 | 0,90 | 0,96 | 1,00 | 1,12 | 1,13 | 1,20 |
| 30 | 1,20 | 1,03 | 1,06 | 0,95 | 0,92 | 0,85 | 0,90 | 0,96 | 1,00 | 1,12 | 1,14 | 1,21 |
| 31 | 1,20 | 1,03 | 1,06 | 0,95 | 0,91 | 0,84 | 0,89 | 0,96 | 1,00 | 1,12 | 1,14 | 1,22 |
| 32 | 1,21 | 1,03 | 1,06 | 0,95 | 0,91 | 0,84 | 0,89 | 0,95 | 1,00 | 1,12 | 1,15 | 1,23 |
| 33 | 1,22 | 1,04 | 1,06 | 0,94 | 0,90 | 0,83 | 0,88 | 0,95 | 1,00 | 1,13 | 1,16 | 1,23 |
| 34 | 1,22 | 1,04 | 1,06 | 0,94 | 0,89 | 0,82 | 0,87 | 0,94 | 1,00 | 1,13 | 1,16 | 1,24 |
| 35 | 1,23 | 1,04 | 1,06 | 0,94 | 0,89 | 0,82 | 0,87 | 0,94 | 1,00 | 1,13 | 1,17 | 1,25 |
| 36 | 1,24 | 1,04 | 1,06 | 0,94 | 0,88 | 0,81 | 0,86 | 0,94 | 1,00 | 1,13 | 1,17 | 1,26 |
| 37 | 1,25 | 1,05 | 1,06 | 0,94 | 0,88 | 0,80 | 0,86 | 0,93 | 1,00 | 1,14 | 1,18 | 1,27 |

Fonte: Fontana (1990).

O índice I foi desenvolvido porque Thornthwaite notou que a temperatura média não era satisfatória, visto que em alguns lugares era afetada por temperaturas inferiores ao ponto de congelamento. Para as condições brasileiras, sem problemas quanto a congelamento, o índice I pode ser substituído por um índice T_x , correspondente a temperatura média anual da região, em °C (Ometto, 1981).

4.2.2.2. Fórmula de Blaney-Criddle

Desenvolvida em 1950, esta fórmula relaciona a água consumida pelas plantas com a temperatura e a porcentagem mensal das horas anuais de luz solar, ou seja:

$$U_c = K.P (0,457 T + 8,13) \quad (14)$$

em que: U_c = uso consuntivo em mm/mês; T = temperatura média mensal do ar, em °C; P = porcentagem mensal das horas anuais de luz solar; e K = coeficiente de uso consuntivo.

Os valores de P variam conforme a latitude (Tabela 4), enquanto os de K , ainda não determinados no Brasil, variam com o tipo de cultura, com os estádios de desenvolvimento da planta e com a região. Na Tabela 5 têm-se os valores de K para diversas culturas, determinados na região oeste dos Estados Unidos.

Para determinar o U_c mensal de uma cultura, usando as Tabelas 4 e 5, deve-se identificar a temperatura média mensal da região e aplicar a fórmula 14.

Para calcular o U_c para todo o ciclo de uma cultura, basta somar os valores de « U_c mensal» dos meses que compõem o seu ciclo.

Como esta fórmula foi desenvolvida para o cálculo do U_c mensal, não deve ser usada para o cálculo do U_c diário, pois seria imprecisa neste caso.

4.2.2.3. Fórmula de Blaney-Morin

É uma modificação da fórmula de Blaney-Criddle, que considera o efeito da umidade relativa.

$$U_c = K.P (0,457T + 8,13) (1,14 - 0,01 UR) \quad (15)$$

onde: U_c = uso consuntivo, em mm/mês; T = temperatura média mensal do ar, em °C; P = porcentagem mensal das horas anuais de luz solar; UR = umidade relativa média mensal, em %; e K = coeficiente de uso consuntivo.

TABELA 4. Valores da porcentagem mensal das horas anuais de luz solar (P), conforme a latitude e meses do ano.

| Lat.Sul | jan. | fev. | mar. | abr. | maio | jun. | jul. | ago. | set. | out. | nov. | dez. |
|---------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 0 | 8,50 | 7,65 | 8,48 | 8,23 | 8,50 | 8,22 | 8,49 | 8,51 | 8,22 | 8,48 | 8,12 | 8,49 |
| 2 | 8,57 | 7,70 | 8,49 | 8,20 | 8,43 | 8,16 | 8,42 | 8,45 | 8,21 | 8,51 | 8,29 | 8,57 |
| 4 | 8,63 | 7,74 | 8,50 | 8,17 | 8,38 | 8,06 | 8,35 | 8,41 | 8,20 | 8,55 | 8,35 | 8,66 |
| 6 | 8,69 | 7,79 | 8,51 | 8,13 | 8,32 | 7,98 | 8,27 | 8,37 | 8,20 | 8,58 | 8,42 | 8,74 |
| 8 | 8,77 | 7,83 | 8,52 | 8,09 | 8,27 | 7,89 | 8,20 | 8,33 | 8,19 | 8,60 | 8,49 | 8,82 |
| 10 | 8,82 | 7,88 | 8,53 | 8,06 | 8,20 | 7,82 | 8,14 | 8,23 | 8,18 | 8,63 | 8,56 | 8,90 |
| 12 | 8,90 | 7,92 | 8,54 | 8,02 | 8,14 | 7,75 | 8,06 | 8,22 | 8,17 | 8,67 | 8,63 | 8,98 |
| 14 | 8,98 | 7,98 | 8,55 | 7,99 | 8,06 | 7,68 | 7,96 | 8,18 | 8,16 | 8,69 | 8,70 | 9,07 |
| 16 | 9,08 | 8,00 | 8,56 | 7,97 | 7,99 | 7,61 | 7,89 | 8,12 | 8,15 | 8,71 | 8,76 | 9,16 |
| 18 | 9,17 | 8,04 | 8,57 | 7,94 | 7,95 | 7,52 | 7,79 | 8,08 | 8,13 | 8,75 | 8,83 | 9,23 |
| 20 | 9,26 | 8,08 | 8,58 | 7,89 | 7,88 | 7,43 | 7,71 | 8,02 | 8,12 | 8,79 | 8,91 | 9,33 |
| 22 | 9,35 | 8,12 | 8,59 | 7,86 | 7,75 | 7,33 | 7,62 | 7,95 | 8,11 | 8,83 | 8,97 | 9,42 |
| 24 | 9,44 | 8,17 | 8,60 | 7,83 | 7,64 | 7,24 | 7,54 | 7,90 | 8,10 | 8,87 | 9,04 | 9,53 |
| 26 | 9,55 | 8,22 | 8,63 | 7,81 | 7,56 | 7,14 | 7,46 | 7,84 | 8,10 | 8,91 | 9,15 | 9,66 |
| 28 | 9,65 | 8,27 | 8,63 | 7,78 | 7,49 | 7,04 | 7,38 | 7,78 | 8,08 | 8,95 | 9,20 | 9,76 |
| 30 | 9,75 | 8,32 | 8,64 | 7,73 | 7,44 | 6,93 | 7,28 | 7,70 | 8,07 | 8,99 | 9,26 | 9,88 |
| 32 | 9,85 | 8,37 | 8,66 | 7,70 | 7,36 | 6,82 | 7,18 | 7,62 | 8,06 | 9,03 | 9,35 | 10,00 |
| 34 | 9,96 | 8,43 | 8,67 | 7,65 | 7,25 | 6,70 | 7,08 | 7,55 | 8,05 | 9,07 | 9,44 | 10,14 |
| 36 | 10,07 | 8,50 | 8,68 | 7,62 | 7,14 | 6,58 | 6,98 | 7,48 | 8,04 | 9,12 | 9,53 | 10,26 |
| 38 | 10,18 | 8,56 | 8,69 | 7,58 | 7,06 | 6,46 | 6,87 | 7,41 | 8,03 | 9,15 | 9,62 | 10,39 |
| 40 | 10,32 | 8,62 | 8,71 | 7,54 | 6,93 | 6,33 | 6,75 | 7,33 | 8,02 | 9,20 | 9,71 | 10,54 |

Fonte: Bernardo (1982).

TABELA 5. Valores dos coeficientes de uso consuntivo (K) das principais culturas, para regiões úmidas.

| Cultura | Ciclo | Máximo Mensal* |
|----------------|-------|----------------|
| Alfafa | 0,85 | 0,95-1,25 |
| Algodão | 0,70 | 0,75-1,10 |
| Arroz irrigado | 1,00 | 1,00-1,30 |
| Banana | 0,90 | |
| Batatinha | 0,70 | 0,85-1,00 |
| Beterraba | 0,70 | 0,85-1,00 |
| Café | 0,70 | |
| Citrus | 0,60 | 0,65-0,75 |
| Feijão | 0,65 | 0,75-0,85 |
| Fumo | 0,70 | |
| Grãos pequenos | 0,75 | 0,85-1,00 |
| Hortaliças | 0,70 | |
| Milho | 0,75 | 0,80-1,20 |
| Pastagens | 0,75 | 0,85-1,15 |
| Sorgo | 0,70 | 0,85-1,10 |
| Tomate | 0,70 | |

* Variação conforme a temperatura mensal e o estágio de crescimento da cultura.

Fontes: Bernardo (1982) e Withers & Vipond (1974).

4.2.2.4. Fórmula de Hargreaves

Esta fórmula foi testada pelo próprio autor para o Nordeste do Brasil (Hargreaves, 1974).

$$ET_p = MF (1,8 T + 32) CH \quad (16)$$

onde: ET_p = evapotranspiração potencial, em mm/mês; MF = fator mensal dependente da latitude, em mm/mês (Tabela 6); T = temperatura média mensal do ar, em °C; e CH = correção da umidade relativa média mensal (UR, em %).

$$CH = 0,158 (100 - UR)^{1/2} \quad (17)$$

quando $CH > 1$, adota-se $CH = 1$.

TABELA 6. Valores do fator MF, em mm/mês, conforme a latitude e meses do ano.

| Lat.Sul | jan. | fev. | mar. | abr. | maio | jun. | jul. | ago. | set. | out. | nov. | dez. |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 2,29 | 2,12 | 2,35 | 2,20 | 2,14 | 1,99 | 2,09 | 2,22 | 2,26 | 2,36 | 2,23 | 2,27 |
| 2 | 2,32 | 2,14 | 2,36 | 2,18 | 2,11 | 1,96 | 2,06 | 2,19 | 2,25 | 2,37 | 2,26 | 2,30 |
| 3 | 2,35 | 2,15 | 2,36 | 2,17 | 2,08 | 1,92 | 2,03 | 2,17 | 2,25 | 2,39 | 2,29 | 2,34 |
| 4 | 2,39 | 2,17 | 2,36 | 2,15 | 2,05 | 1,89 | 1,99 | 2,15 | 2,24 | 2,40 | 2,32 | 2,37 |
| 5 | 2,42 | 2,19 | 2,36 | 2,13 | 2,02 | 1,85 | 1,96 | 2,17 | 2,23 | 2,41 | 2,34 | 2,41 |
| 6 | 2,45 | 2,21 | 2,36 | 2,12 | 1,99 | 1,82 | 1,93 | 2,18 | 2,23 | 2,42 | 2,37 | 2,44 |
| 7 | 2,48 | 2,22 | 2,36 | 2,10 | 1,96 | 1,78 | 1,89 | 2,08 | 2,22 | 2,43 | 2,40 | 2,48 |
| 8 | 2,51 | 2,24 | 2,36 | 2,08 | 1,93 | 1,75 | 1,86 | 2,05 | 2,21 | 2,44 | 2,42 | 2,51 |
| 9 | 2,54 | 2,25 | 2,36 | 2,06 | 1,90 | 1,71 | 1,82 | 2,03 | 2,20 | 2,45 | 2,45 | 2,54 |
| 10 | 2,57 | 2,27 | 2,36 | 2,04 | 1,86 | 1,68 | 1,79 | 2,00 | 2,19 | 2,46 | 2,47 | 2,58 |
| 11 | 2,60 | 2,28 | 2,35 | 2,02 | 1,83 | 1,64 | 1,75 | 1,98 | 1,18 | 2,47 | 2,50 | 2,61 |
| 12 | 2,62 | 2,29 | 2,35 | 2,00 | 1,80 | 1,61 | 1,72 | 1,95 | 2,17 | 2,48 | 2,52 | 2,64 |
| 13 | 2,65 | 2,31 | 2,35 | 1,98 | 1,77 | 1,57 | 1,68 | 1,92 | 2,16 | 2,48 | 2,54 | 2,67 |
| 14 | 2,68 | 2,32 | 2,34 | 1,96 | 1,73 | 1,54 | 1,65 | 1,89 | 2,14 | 2,49 | 2,57 | 2,71 |
| 15 | 2,71 | 2,33 | 2,33 | 1,94 | 1,70 | 1,50 | 1,61 | 1,87 | 2,13 | 2,50 | 2,59 | 2,74 |
| 16 | 2,73 | 2,34 | 2,33 | 1,91 | 1,67 | 1,46 | 1,58 | 1,84 | 2,12 | 2,50 | 2,61 | 2,77 |
| 17 | 2,78 | 2,35 | 2,32 | 1,89 | 1,63 | 1,43 | 1,54 | 1,81 | 2,10 | 2,50 | 2,63 | 2,80 |
| 18 | 2,79 | 2,36 | 2,31 | 1,87 | 1,60 | 1,39 | 1,50 | 1,78 | 2,09 | 2,51 | 2,65 | 2,83 |
| 19 | 2,81 | 2,37 | 2,30 | 1,84 | 1,56 | 1,35 | 1,47 | 1,75 | 2,07 | 2,51 | 2,67 | 2,86 |
| 20 | 2,84 | 2,38 | 2,29 | 1,82 | 1,53 | 1,32 | 1,43 | 1,72 | 2,06 | 2,51 | 2,69 | 2,89 |
| 21 | 2,86 | 2,38 | 2,28 | 1,79 | 1,49 | 1,28 | 1,39 | 1,69 | 2,04 | 2,51 | 2,71 | 2,92 |
| 22 | 2,88 | 2,39 | 2,27 | 1,77 | 1,46 | 1,24 | 1,36 | 1,66 | 2,02 | 2,51 | 2,73 | 2,95 |
| 23 | 2,91 | 2,40 | 2,26 | 1,74 | 1,42 | 1,21 | 1,32 | 1,63 | 2,00 | 2,51 | 2,75 | 2,98 |
| 24 | 2,93 | 2,40 | 2,25 | 1,71 | 1,39 | 1,17 | 1,28 | 1,59 | 1,98 | 2,51 | 2,76 | 3,00 |
| 25 | 2,95 | 2,41 | 2,23 | 1,69 | 1,35 | 1,13 | 1,25 | 1,56 | 1,95 | 2,51 | 2,78 | 3,03 |

Fonte: Hargreaves (1974).

4.2.2.5. Fórmula de Garcia-Lopez

É fundamentada na influência do déficit de saturação e da temperatura na evapotranspiração. Dada a dificuldade na obtenção dos valores do déficit de saturação, utiliza a umidade relativa. Foi desenvolvida utilizando dados de estações meteorológicas nitidamente tropicais, situadas entre as latitudes de 15°N e 15°S (Lobato & Lobato, 1979).

$$ET_p = 1,21 \cdot 10^X (1 - 0,01 UR) + 0,21 T - 2,30 \quad (18)$$

onde: $X = \frac{7,45T}{234,7 + T} \quad (19)$

em que: ET_p = evapotranspiração potencial, em mm/dia; T = temperatura média mensal do ar, em °C; e UR = umidade relativa média mensal, em %.

4.2.2.6. Fórmula de Jensen-Haise

Jensen e Haise apresentaram uma fórmula baseada na temperatura e radiação solar.

$$ET_p = (0,078 + 0,0252 T)R_s \quad (20)$$

onde: ET_p = evapotranspiração potencial, em mm/dia; T = temperatura média mensal do ar, em °C; e R_s = radiação solar global, em mm/dia.

4.2.2.7. Fórmula de Turc

Baseia-se na radiação solar global e na temperatura.

$$ET_p = (R_s + 50) \cdot 0,013 T / (T + 15) \quad (21)$$

onde: ET_p = evapotranspiração potencial, em mm/dia; R_s = radiação solar global, em cal/cm²/dia; e T = temperatura média mensal do ar, em °C.

4.2.2.8. Fórmula de Penman

Penman, combinando o balanço de energia com princípios aerodinâmicos, propôs a seguinte fórmula:

$$ET_p = \frac{(\Delta / \gamma)Rn + Ea}{(\Delta / \gamma) + 1} \quad (22)$$

na qual: ET_p = evapotranspiração potencial, em mm/dia; Rn = saldo de radiação ou radiação líquida, em mm/dia; Δ = tangente da curva de saturação de vapor, em função da temperatura do ar, em mm Hg/°C; γ = constante psicrométrica (0,49 mm Hg/°C); e Ea = poder evaporante do ar, em mm/dia.

$\frac{\Delta}{\gamma}$ pode ser obtido na Tabela 1.

O poder evaporante do ar (Ea) pode ser calculado pela seguinte equação:

$$Ea = 0,35 (1 + 0,00625 U_2) (e_s - e) \quad (23)$$

em que: U_2 = velocidade do vento a 2,0 m acima da superfície do solo, em km/dia; e_s = pressão máxima de saturação de vapor à temperatura média do ar, em mm Hg (Tabela 7); e e = pressão atual de vapor d'água (média diária), em mm Hg.

Quando não se dispõem de dados de vento a 2,0 m, pode-se utilizar a expressão:

$$U_2 = (2/Z_1)^{1/7} \cdot U_1 \quad (24)$$

onde: U_1 = velocidade do vento, em km/dia, na altura de medição Z_1 , em m.

Considerando que $e = e_s \cdot UR/100$, a expressão $e_s - e$ pode ser substituída por $e_s (1 - 0,01UR)$, sendo UR a umidade relativa em porcentagem, quando não se dispõem de dados de e .

O saldo de radiação (Rn) pode ser calculado pela fórmula de Brunt:

$$Rn = R_s (1-r) - \frac{\sigma T_a^4}{59} (0,56 - 0,092 e^{1/2}) (0,1 + 0,9 n/N) \quad (25)$$

onde: R_s = radiação solar global, em mm/dia; r = coeficiente de reflexão ou albedo; σ = constante de Stephan - Boltzman = $11,9088 \cdot 10^{-8}$ cal/cm²/dia/°K⁴; T_a = temperatura média do ar, em °K; e = pressão atual de vapor d'água, em mm Hg; n = número de horas ocorridas de insolação; e N = número máximo possível de horas de insolação (Tabela 8).

TABELA 7. Pressão de saturação de vapor d'água no ar (e_s), em mm Hg, em função da temperatura, em °C.

| T(°C) | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 4,58 | 4,61 | 4,65 | 4,68 | 4,72 | 4,75 | 4,79 | 4,82 | 4,86 | 4,89 |
| 1 | 4,93 | 4,96 | 5,00 | 5,03 | 5,07 | 5,11 | 5,14 | 5,18 | 5,22 | 5,26 |
| 2 | 5,29 | 5,33 | 5,37 | 5,41 | 5,45 | 5,49 | 5,53 | 5,57 | 5,61 | 5,65 |
| 3 | 5,69 | 5,73 | 5,77 | 5,81 | 5,85 | 5,89 | 5,93 | 5,97 | 6,02 | 6,06 |
| 4 | 6,10 | 6,14 | 6,19 | 6,23 | 6,27 | 6,32 | 6,36 | 6,41 | 6,45 | 6,50 |
| 5 | 6,54 | 6,59 | 6,64 | 6,68 | 6,73 | 6,78 | 6,82 | 6,87 | 6,92 | 6,97 |
| 6 | 7,01 | 7,06 | 7,11 | 7,16 | 7,21 | 7,26 | 7,31 | 7,36 | 7,41 | 7,46 |
| 7 | 7,51 | 7,57 | 7,62 | 7,67 | 7,72 | 7,78 | 7,83 | 7,88 | 7,94 | 7,99 |
| 8 | 8,05 | 8,10 | 8,16 | 8,21 | 8,27 | 8,32 | 8,38 | 8,44 | 8,49 | 8,55 |
| 9 | 8,61 | 8,67 | 8,73 | 8,79 | 8,85 | 8,91 | 8,97 | 9,03 | 9,09 | 9,15 |
| 10 | 9,21 | 9,27 | 9,33 | 9,40 | 9,46 | 9,52 | 9,59 | 9,65 | 9,71 | 9,78 |
| 11 | 9,84 | 9,91 | 9,98 | 10,04 | 10,11 | 10,18 | 10,24 | 10,31 | 10,38 | 10,45 |
| 12 | 10,52 | 10,59 | 10,66 | 10,73 | 10,80 | 10,87 | 10,94 | 11,01 | 11,09 | 11,16 |
| 13 | 11,23 | 11,31 | 11,38 | 11,45 | 11,53 | 11,60 | 11,68 | 11,76 | 11,83 | 11,91 |
| 14 | 11,99 | 12,07 | 12,14 | 12,22 | 12,30 | 12,38 | 12,46 | 12,54 | 12,62 | 12,71 |
| 15 | 12,79 | 12,87 | 12,95 | 13,04 | 13,12 | 13,21 | 13,29 | 13,38 | 13,46 | 13,55 |
| 16 | 13,63 | 13,72 | 13,81 | 13,90 | 13,99 | 14,09 | 14,17 | 14,23 | 14,35 | 14,44 |
| 17 | 14,53 | 14,62 | 14,72 | 14,81 | 14,90 | 15,00 | 15,09 | 15,19 | 15,28 | 15,38 |
| 18 | 15,48 | 15,58 | 15,67 | 15,77 | 15,87 | 15,97 | 16,07 | 16,17 | 16,27 | 16,37 |
| 19 | 16,48 | 16,58 | 16,69 | 16,79 | 16,89 | 17,00 | 17,11 | 17,21 | 17,32 | 17,43 |
| 20 | 17,54 | 17,64 | 17,75 | 17,86 | 17,97 | 18,09 | 18,20 | 18,31 | 18,42 | 18,54 |
| 21 | 18,65 | 18,77 | 18,88 | 19,00 | 19,11 | 19,23 | 19,35 | 19,47 | 19,59 | 19,71 |
| 22 | 19,83 | 19,95 | 20,07 | 20,19 | 20,32 | 20,44 | 20,57 | 20,69 | 20,82 | 20,94 |
| 23 | 21,07 | 21,20 | 21,32 | 21,45 | 21,58 | 21,71 | 21,85 | 21,98 | 22,11 | 22,24 |
| 24 | 22,38 | 22,51 | 22,65 | 22,79 | 22,92 | 23,06 | 23,20 | 23,34 | 23,48 | 23,62 |
| 25 | 23,76 | 23,90 | 24,04 | 24,18 | 24,33 | 24,47 | 24,62 | 24,76 | 24,91 | 25,06 |
| 26 | 25,21 | 25,36 | 25,51 | 25,66 | 25,81 | 25,90 | 26,12 | 26,27 | 26,43 | 26,58 |
| 27 | 26,74 | 26,90 | 27,06 | 27,21 | 27,37 | 27,54 | 27,70 | 27,86 | 28,02 | 28,19 |
| 28 | 28,35 | 28,51 | 28,68 | 28,85 | 29,02 | 29,18 | 29,35 | 29,53 | 29,70 | 29,87 |
| 29 | 30,04 | 30,22 | 30,39 | 30,57 | 30,75 | 30,92 | 31,10 | 31,28 | 31,46 | 31,64 |
| 30 | 31,82 | 32,01 | 32,19 | 32,38 | 32,56 | 32,75 | 32,93 | 33,12 | 33,31 | 33,50 |
| 31 | 33,70 | 33,89 | 34,08 | 34,28 | 34,47 | 34,67 | 34,86 | 35,06 | 35,26 | 33,46 |
| 32 | 35,66 | 35,87 | 36,07 | 36,27 | 36,48 | 36,68 | 36,89 | 37,10 | 37,31 | 37,52 |
| 33 | 37,73 | 37,94 | 38,16 | 38,37 | 38,58 | 38,80 | 39,02 | 39,24 | 39,46 | 39,68 |
| 34 | 39,90 | 40,12 | 40,34 | 40,57 | 40,90 | 41,02 | 41,25 | 41,48 | 41,71 | 41,94 |
| 35 | 42,18 | 42,41 | 42,64 | 42,88 | 43,12 | 43,36 | 43,60 | 43,84 | 44,08 | 44,32 |
| 36 | 44,56 | 44,81 | 45,05 | 45,30 | 45,55 | 45,90 | 46,05 | 46,30 | 46,56 | 46,81 |
| 37 | 47,07 | 47,32 | 47,58 | 47,84 | 48,10 | 48,36 | 48,63 | 48,89 | 49,16 | 49,42 |
| 38 | 49,69 | 49,96 | 50,23 | 50,50 | 50,77 | 51,05 | 51,32 | 51,60 | 51,88 | 52,16 |
| 39 | 52,44 | 52,73 | 53,01 | 53,29 | 53,58 | 53,87 | 54,16 | 54,45 | 54,74 | 55,03 |
| 40 | 55,32 | 55,61 | 55,91 | 56,21 | 56,51 | 56,81 | 57,11 | 57,41 | 57,72 | 58,03 |
| 41 | 58,34 | 58,65 | 58,96 | 59,27 | 59,58 | 59,90 | 60,22 | 60,54 | 60,86 | 61,13 |
| 42 | 61,50 | 61,82 | 62,14 | 62,47 | 62,80 | 63,13 | 63,46 | 63,69 | 64,12 | 64,46 |
| 43 | 64,80 | 65,14 | 65,48 | 65,82 | 66,16 | 66,51 | 66,86 | 67,21 | 67,56 | 67,91 |
| 44 | 68,26 | 68,61 | 68,97 | 69,33 | 69,69 | 70,05 | 70,41 | 70,77 | 71,14 | 71,51 |

Fonte: Fontana (1990).

TABELA 8. Duração máxima da insolação (N), em horas e décimos, conforme a latitude e meses do ano.

| Lat. | jan. | fev. | mar. | abr. | maio | jun. | jul. | ago. | set. | out. | nov. | dez. |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5N | 11,74 | 11,85 | 11,97 | 12,11 | 12,22 | 12,28 | 12,25 | 12,15 | 11,98 | 11,90 | 11,78 | 11,72 |
| 4N | 11,80 | 11,88 | 11,98 | 12,09 | 12,18 | 12,22 | 12,20 | 12,12 | 12,02 | 11,91 | 11,82 | 11,77 |
| 3N | 11,85 | 11,90 | 11,98 | 12,06 | 12,13 | 12,17 | 12,15 | 12,09 | 12,01 | 11,94 | 11,87 | 11,83 |
| 2N | 11,90 | 11,93 | 11,98 | 12,04 | 12,09 | 12,11 | 12,10 | 12,06 | 12,01 | 11,95 | 11,91 | 11,88 |
| 1N | 11,94 | 11,96 | 11,99 | 12,02 | 12,04 | 12,05 | 12,04 | 12,03 | 12,00 | 11,97 | 11,95 | 11,94 |
| 0 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 |
| 1S | 12,05 | 12,02 | 12,00 | 11,97 | 11,95 | 11,94 | 11,94 | 11,97 | 11,99 | 12,02 | 12,04 | 12,05 |
| 2S | 12,09 | 12,05 | 12,01 | 11,95 | 11,91 | 11,88 | 11,89 | 11,93 | 11,98 | 12,03 | 12,08 | 12,10 |
| 3S | 12,15 | 12,08 | 12,01 | 11,93 | 11,86 | 11,83 | 11,84 | 11,90 | 11,97 | 12,05 | 12,12 | 12,16 |
| 4S | 12,20 | 12,12 | 12,01 | 11,90 | 11,82 | 11,77 | 11,80 | 11,87 | 11,97 | 12,08 | 12,18 | 12,22 |
| 5S | 12,24 | 12,15 | 12,01 | 11,86 | 11,78 | 11,71 | 11,74 | 11,83 | 11,97 | 12,10 | 12,22 | 12,28 |
| 6S | 12,30 | 12,18 | 12,02 | 11,85 | 11,73 | 11,66 | 11,69 | 11,80 | 11,95 | 12,12 | 12,26 | 12,33 |
| 7S | 12,35 | 12,18 | 12,02 | 11,84 | 11,68 | 11,61 | 11,65 | 11,77 | 11,95 | 12,14 | 12,30 | 12,39 |
| 8S | 12,40 | 12,25 | 12,03 | 11,81 | 11,63 | 11,55 | 11,59 | 11,74 | 11,95 | 12,16 | 12,34 | 12,44 |
| 9S | 12,45 | 12,28 | 12,04 | 11,79 | 11,59 | 11,50 | 11,54 | 11,70 | 11,93 | 12,18 | 12,40 | 12,50 |
| 10S | 12,50 | 12,31 | 12,04 | 11,76 | 11,54 | 11,44 | 11,49 | 11,66 | 11,93 | 12,20 | 12,42 | 12,55 |
| 11S | 12,55 | 12,33 | 12,05 | 11,74 | 11,50 | 11,37 | 11,43 | 11,63 | 11,92 | 12,22 | 12,48 | 12,61 |
| 12S | 12,60 | 12,36 | 12,05 | 11,73 | 11,45 | 11,32 | 11,38 | 11,61 | 11,90 | 12,24 | 12,52 | 12,69 |
| 13S | 12,65 | 12,38 | 12,05 | 11,70 | 11,40 | 11,24 | 11,34 | 11,57 | 11,89 | 12,28 | 12,58 | 12,75 |
| 14S | 12,71 | 12,41 | 12,05 | 11,68 | 11,34 | 11,18 | 11,28 | 11,53 | 11,88 | 12,30 | 12,62 | 12,80 |
| 15S | 12,76 | 12,43 | 12,06 | 11,62 | 11,28 | 11,12 | 11,23 | 11,48 | 11,85 | 12,33 | 12,69 | 12,88 |
| 16S | 12,81 | 12,48 | 12,06 | 11,61 | 11,24 | 11,05 | 11,18 | 11,43 | 11,83 | 12,36 | 12,74 | 12,93 |
| 17S | 12,88 | 12,51 | 12,06 | 11,55 | 11,20 | 11,03 | 11,12 | 11,39 | 11,80 | 12,38 | 12,76 | 13,00 |
| 18S | 12,92 | 12,58 | 12,07 | 11,52 | 11,15 | 10,95 | 11,06 | 11,37 | 11,85 | 12,44 | 12,80 | 13,06 |
| 19S | 13,00 | 12,62 | 12,07 | 11,50 | 11,08 | 10,89 | 11,00 | 11,30 | 11,90 | 12,46 | 12,88 | 13,10 |
| 20S | 13,06 | 12,65 | 12,07 | 11,48 | 11,00 | 10,80 | 10,96 | 11,28 | 11,92 | 12,50 | 12,92 | 13,15 |
| 21S | 13,10 | 12,67 | 12,07 | 11,45 | 10,97 | 10,72 | 10,92 | 11,25 | 11,96 | 12,56 | 12,98 | 13,21 |
| 22S | 13,14 | 12,70 | 12,07 | 11,41 | 10,92 | 10,69 | 10,87 | 11,20 | 12,00 | 12,60 | 13,02 | 13,30 |
| 23S | 13,20 | 12,80 | 12,07 | 11,38 | 10,85 | 10,60 | 10,80 | 11,14 | 12,00 | 12,70 | 13,10 | 13,40 |
| 24S | 13,26 | 12,86 | 12,08 | 11,33 | 10,80 | 10,55 | 10,74 | 11,10 | 12,00 | 12,72 | 13,16 | 13,47 |
| 25S | 13,35 | 12,87 | 12,08 | 11,30 | 10,78 | 10,48 | 10,68 | 11,09 | 12,00 | 12,74 | 13,20 | 13,54 |
| 26S | 13,40 | 12,88 | 12,08 | 11,29 | 10,76 | 10,40 | 10,62 | 11,08 | 12,00 | 12,76 | 13,24 | 13,61 |
| 27S | 13,46 | 12,90 | 12,10 | 11,28 | 10,70 | 10,35 | 10,60 | 11,10 | 12,01 | 12,78 | 13,26 | 13,68 |
| 28S | 13,50 | 12,91 | 12,11 | 11,27 | 10,65 | 10,29 | 10,58 | 11,12 | 12,01 | 12,80 | 13,30 | 13,72 |
| 29S | 13,55 | 12,93 | 12,12 | 11,24 | 10,62 | 10,20 | 10,50 | 11,13 | 12,01 | 12,82 | 13,34 | 13,80 |
| 30S | 13,60 | 13,00 | 12,15 | 11,20 | 10,55 | 10,10 | 10,40 | 11,15 | 12,01 | 12,85 | 13,40 | 13,90 |
| 31S | 13,68 | 13,07 | 12,18 | 11,17 | 10,49 | 10,00 | 10,34 | 11,11 | 12,01 | 12,88 | 13,46 | 13,98 |
| 32S | 13,78 | 13,16 | 12,21 | 11,14 | 10,42 | 9,92 | 10,28 | 11,08 | 12,01 | 12,92 | 13,53 | 14,08 |
| 33S | 13,86 | 13,25 | 12,25 | 11,10 | 10,34 | 9,86 | 10,20 | 11,04 | 12,02 | 12,95 | 13,60 | 14,19 |
| 34S | 13,96 | 13,32 | 12,30 | 11,07 | 10,26 | 9,78 | 10,14 | 11,00 | 12,02 | 13,00 | 13,66 | 14,27 |
| 35S | 14,08 | 13,39 | 12,34 | 11,04 | 10,20 | 9,70 | 10,09 | 10,95 | 12,03 | 13,04 | 13,72 | 14,38 |
| 36S | 14,20 | 13,46 | 12,39 | 11,01 | 10,16 | 9,64 | 10,00 | 10,90 | 12,03 | 13,08 | 13,84 | 14,50 |

Fonte: Ometto (1981).

Os valores de $\sigma T^4/59$, para diferentes valores de T, são apresentados na Tabela 9. O valor de r normalmente é considerado igual a 0,20, variando de 0,05, para extensa área de espelho d'água, a 0,25, para extensa área verde de plantas baixas. Klar (1991) apresenta valores de r para algumas superfícies e localidades (Tabela 10).

TABELA 9. Valores de $\sigma T^4/59$, em milímetros de evaporação equivalente por dia, em função da temperatura, em °C.

| T(°C) | $\frac{\sigma T^4}{59}$ | T(°C) | $\frac{\sigma T^4}{59}$ | T(°C) | $\frac{\sigma T^4}{59}$ |
|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|
| 7,0 | 12,41 | 17,5 | 14,37 | 28,0 | 16,58 |
| 7,5 | 12,49 | 18,0 | 14,47 | 28,5 | 16,68 |
| 8,0 | 12,57 | 18,5 | 14,58 | 29,0 | 16,80 |
| 8,5 | 12,66 | 19,0 | 14,68 | 29,5 | 16,91 |
| 9,0 | 12,76 | 19,5 | 14,78 | 30,0 | 17,02 |
| 9,5 | 12,85 | 20,0 | 14,88 | 30,5 | 17,12 |
| 10,0 | 12,93 | 20,5 | 14,98 | 31,0 | 17,24 |
| 10,5 | 13,03 | 21,0 | 15,08 | 31,5 | 17,35 |
| 11,0 | 13,13 | 21,5 | 15,19 | 32,0 | 17,47 |
| 11,5 | 13,24 | 22,0 | 15,29 | 32,5 | 17,59 |
| 12,0 | 13,32 | 22,5 | 15,39 | 33,0 | 17,69 |
| 12,5 | 13,42 | 23,0 | 15,49 | 33,5 | 17,81 |
| 13,0 | 13,51 | 23,5 | 15,61 | 34,0 | 17,93 |
| 13,5 | 13,61 | 24,0 | 15,71 | 34,5 | 18,05 |
| 14,0 | 13,69 | 24,5 | 15,81 | 35,0 | 18,17 |
| 14,5 | 13,80 | 25,0 | 15,91 | 35,5 | 18,29 |
| 15,0 | 13,88 | 25,5 | 16,03 | 36,0 | 18,41 |
| 15,5 | 13,98 | 26,0 | 16,13 | 36,5 | 18,52 |
| 16,0 | 14,07 | 26,5 | 16,24 | 37,0 | 18,64 |
| 16,5 | 14,17 | 27,0 | 16,34 | 37,5 | 18,78 |
| 17,0 | 14,27 | 27,5 | 16,44 | 38,0 | 18,90 |

Fonte: Ometto (1981).

Como a radiação solar global nem sempre é medida nas estações meteorológicas, pode-se calculá-la, em mm/dia, a partir de dados de insolação, utilizando-se a fórmula:

$$R_s = \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad (26)$$

onde: R_a = radiação sobre o topo da atmosfera, em mm/dia (Tabela 11); e a e b = coeficientes.

TABELA 10. Valores do coeficiente de reflexão (r) para algumas superfícies e localidades.

| Cultura | Localidade | r |
|-----------------------|----------------|-----------|
| Capins, batata, trigo | Inglaterra | 0,25-0,27 |
| Batata | Rússia | 0,15-0,25 |
| Milho | Estados Unidos | 0,23 |
| Algodão irrigado | Austrália | 0,17-0,20 |
| Cana-de-açúcar | Havaí | 0,05-0,18 |
| Abacaxi | Havaí | 0,05-0,08 |
| Algodão | Rússia | 0,20-0,25 |

Fonte: Klar (1991).

TABELA 11. Radiação sobre o topo da atmosfera (Ra), em mm/dia, em função da latitude e meses do ano.

| Lat. | jan. | fev. | mar. | abr. | maio. | jun. | jul. | ago. | set. | out. | nov. | dez. |
|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 6N | 13,9 | 14,8 | 15,4 | 15,4 | 15,1 | 14,7 | 14,9 | 15,2 | 15,3 | 15,0 | 14,2 | 13,7 |
| 4N | 14,3 | 15,0 | 15,5 | 15,5 | 14,9 | 14,4 | 14,6 | 15,1 | 15,3 | 15,1 | 14,5 | 14,1 |
| 2N | 14,7 | 15,3 | 15,6 | 15,3 | 14,6 | 14,2 | 14,3 | 14,9 | 15,3 | 15,3 | 14,8 | 14,4 |
| 0 | 15,0 | 15,5 | 15,7 | 15,3 | 14,4 | 13,9 | 14,1 | 14,8 | 15,3 | 15,4 | 15,1 | 14,8 |
| 2S | 15,3 | 15,7 | 15,7 | 15,1 | 14,1 | 13,5 | 13,7 | 14,5 | 15,2 | 15,5 | 15,3 | 15,1 |
| 4S | 15,5 | 15,8 | 15,6 | 14,9 | 13,8 | 13,2 | 13,4 | 14,3 | 15,1 | 15,6 | 15,5 | 15,4 |
| 6S | 15,8 | 16,0 | 15,6 | 14,7 | 13,4 | 12,8 | 13,1 | 14,0 | 15,0 | 15,7 | 15,8 | 15,7 |
| 8S | 16,1 | 16,1 | 15,5 | 14,4 | 13,1 | 12,4 | 12,7 | 13,7 | 14,9 | 15,8 | 16,0 | 16,0 |
| 10S | 16,4 | 16,3 | 15,5 | 14,2 | 12,8 | 12,0 | 12,4 | 13,5 | 14,8 | 15,9 | 16,2 | 16,2 |
| 12S | 16,6 | 16,3 | 15,4 | 14,0 | 12,5 | 11,6 | 12,0 | 13,2 | 14,7 | 15,8 | 16,4 | 16,5 |
| 14S | 16,7 | 16,4 | 15,3 | 13,7 | 12,1 | 11,2 | 11,6 | 12,9 | 14,5 | 15,8 | 16,5 | 16,6 |
| 16S | 16,9 | 16,4 | 15,2 | 13,5 | 11,7 | 10,8 | 11,2 | 12,6 | 14,3 | 15,8 | 16,7 | 16,8 |
| 18S | 17,1 | 16,5 | 15,1 | 13,2 | 11,4 | 10,4 | 10,8 | 12,3 | 14,1 | 15,8 | 16,8 | 17,1 |
| 20S | 17,3 | 16,5 | 15,0 | 13,0 | 11,0 | 10,0 | 10,4 | 12,0 | 13,9 | 15,8 | 17,0 | 17,4 |
| 22S | 17,4 | 16,5 | 14,8 | 12,6 | 10,6 | 9,6 | 10,0 | 11,6 | 13,7 | 15,7 | 17,0 | 17,5 |
| 24S | 17,5 | 16,5 | 14,6 | 12,3 | 10,2 | 9,1 | 9,5 | 11,2 | 13,4 | 15,6 | 17,1 | 17,7 |
| 26S | 17,6 | 16,4 | 14,4 | 12,0 | 9,7 | 8,7 | 9,1 | 10,9 | 13,2 | 15,5 | 17,2 | 17,7 |
| 28S | 17,7 | 16,4 | 14,3 | 11,6 | 9,3 | 8,2 | 8,6 | 10,4 | 13,0 | 15,4 | 17,2 | 17,8 |
| 30S | 17,8 | 16,4 | 14,0 | 11,3 | 8,9 | 7,8 | 8,1 | 10,1 | 12,7 | 15,3 | 17,3 | 17,9 |
| 32S | 17,8 | 16,2 | 13,8 | 10,9 | 8,5 | 7,3 | 7,7 | 9,6 | 12,4 | 15,1 | 17,2 | 18,1 |
| 34S | 17,8 | 16,1 | 13,5 | 10,5 | 8,0 | 6,8 | 7,2 | 9,2 | 12,0 | 14,9 | 17,1 | 18,1 |
| 36S | 17,9 | 16,0 | 13,2 | 10,1 | 7,5 | 6,3 | 6,8 | 8,8 | 11,7 | 14,6 | 17,0 | 18,2 |
| 38S | 17,9 | 15,8 | 12,8 | 9,6 | 7,1 | 5,8 | 6,3 | 8,3 | 11,4 | 14,4 | 17,0 | 18,3 |

Fonte: Doorenbos & Pruitt (1976).

Moreira (1993) apresenta valores de **a** e **b** para algumas localidades e Withers & Vipond (1974) apresentam valores destes coeficientes para algumas latitudes (Tabela 12). Para a microrregião do Mato Grosso de Goiás, onde Goiânia está inserida, Lobato et al. (1982/83) determinaram os valores de 0,27 e 0,49 para **a** e **b**, respectivamente.

TABELA 12. Coeficientes utilizados para cálculo da radiação solar global (Rs) a partir de dados de insolação relativa (n/N).

| Localidade | Coeficiente | |
|-----------------------------|-------------|------|
| | a | b |
| Regiões frias e temperadas | 0,18 | 0,55 |
| Regiões tropicais e secas | 0,25 | 0,45 |
| Regiões tropicais e úmidas | 0,29 | 0,42 |
| Média mundial | 0,25 | 0,50 |
| Estado de São Paulo | 0,24 | 0,58 |
| Estado do Rio Grande do Sul | 0,23 | 0,46 |
| Cidade de Pelotas - RS | 0,35 | 0,46 |
| Cidade de Juazeiro - BA | 0,24 | 0,58 |
| Cidade de Recife - PE | 0,26 | 0,31 |
| Latitude (N e S) | | |
| 54 | 0,21 | 0,55 |
| 36 | 0,23 | 0,53 |
| 24 | 0,28 | 0,49 |
| 13 | 0,26 | 0,50 |
| 3 | 0,25 | 0,44 |

Fontes: Moreira (1993) e Withers & Vipond (1974).

O saldo de radiação também pode ser estimado através de relações estabelecidas entre o saldo de radiação medido sobre uma cultura e a radiação solar global (Tabela13).

TABELA 13. Equações de regressão linear entre o saldo de radiação (Rn) e a radiação solar global (Rs) determinadas para diversas superfícies vegetadas.

| Cultura | Equação |
|--------------------|---|
| Soja | $Rn = -0,68 + 0,870 Rs$ (MJ/m ² /dia)* |
| Feijão | $Rn = 9,51 + 0,617 Rs$ (cal/cm ² /dia) |
| Milho | $Rn = 0,114 + 0,669 Rs$ (MJ/m ² /dia) |
| Milheto | $Rn = 2,146 + 0,647 Rs$ (MJ/m ² /dia) |
| Superfície gramada | $Rn = -18,81 + 0,690 Rs$ (cal/cm ² /dia) |

* MJ/m²/dia = 23,8846 cal/cm²/dia.

Fonte: Fontana (1990).

4.2.2.9. Fórmula de Priestley-Taylor

É uma simplificação do método de Penman (Fontana, 1990). A evapotranspiração é dada por:

$$ET_p = \alpha \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (Rn - S) \right] \quad (27)$$

onde: ET_p = evapotranspiração potencial, em mm/dia; α = constante de proporcionalidade; Δ = tangente da curva de saturação de vapor, em função da temperatura do ar, em mm Hg/°C; γ = constante psicrométrica (0,49mm Hg/°C); Rn = saldo de radiação, em mm/dia; e S = fluxo de calor no solo, em mm/dia.

O termo S , quando comparado a Rn , é muito pequeno, podendo ser desprezado. Portanto:

$$ET_p = \alpha \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Rn \right) \quad (28)$$

Valores de $\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$, em função da temperatura, são apresentados na

Tabela 14. A constante de proporcionalidade depende, fundamentalmente, da cultura e do clima.

TABELA 14. Valores de $\Delta/(\Delta + \gamma)$, em função da temperatura (T), em °C.

| T(°C) | $\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ | T(°C) | $\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ | T(°C) | $\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ | T(°C) | $\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ |
|-------|----------------------------------|-------|----------------------------------|-------|----------------------------------|-------|----------------------------------|
| 1 | 0,37 | 11 | 0,58 | 21 | 0,69 | 31 | 0,80 |
| 2 | 0,44 | 12 | 0,58 | 22 | 0,71 | 32 | 0,81 |
| 3 | 0,44 | 13 | 0,61 | 23 | 0,72 | 33 | 0,81 |
| 4 | 0,44 | 14 | 0,61 | 24 | 0,72 | 34 | 0,81 |
| 5 | 0,50 | 15 | 0,61 | 25 | 0,74 | 35 | 0,82 |
| 6 | 0,50 | 16 | 0,64 | 26 | 0,75 | 36 | 0,84 |
| 7 | 0,54 | 17 | 0,64 | 27 | 0,76 | 37 | 0,84 |
| 8 | 0,54 | 18 | 0,67 | 28 | 0,76 | 38 | 0,85 |
| 9 | 0,54 | 19 | 0,67 | 29 | 0,78 | 39 | 0,85 |
| 10 | 0,54 | 20 | 0,67 | 30 | 0,79 | 40 | 0,85 |

Fonte: Fontana (1990).

Priestley e Taylor propuseram o valor de 1,26 como média para diversas superfícies vegetadas, em condições de ótima disponibilidade hídrica. Fontana (1990) apresenta valores de α determinados no Brasil:

. Cultura da soja:

$$\alpha_1 = 1,24 \pm 0,16$$

$$\alpha_2 = 1,22 \pm 0,15$$

. Cultura do feijoeiro:

$$\alpha_1 = 1,313 \pm 0,132$$

$$\alpha_2 = 1,220 \pm 0,146$$

sendo α_1 calculado pela equação 27, e α_2 , pela equação 28.

4.2.2.10. Comparação entre as fórmulas

A vantagem das fórmulas, principalmente das mais simples, é que elas requerem somente os dados mais comumente medidos (assim, podem ser usadas na maioria das áreas) e cálculos simples. Entretanto, sua natureza empírica limita sua utilidade, restringindo sua abrangência geográfica. A evapotranspiração é uma função da resposta da planta à energia total do meio ambiente. A temperatura ou a umidade, por si só, não são uma medida da energia total, embora, naturalmente, esta possa ser largamente influenciada por aquelas.

O uso de fórmulas empíricas deve, portanto, ser **restringido** ao tipo de clima para o qual foram desenvolvidas. Quando possível, estas fórmulas devem ser **calibradas** na localidade em que serão aplicadas, usando, para tanto, lisímetros ou fórmulas mais sofisticadas.

Se a variação da evapotranspiração local for causada pela **temperatura**, com a umidade permanecendo quase constante, deve-se usar uma fórmula baseada na **temperatura**. Se, ao longo do ano, a temperatura permanecer mais ou menos constante, uma fórmula que envolva **umidade** dará melhores resultados do que uma baseada apenas na temperatura.

Das fórmulas empíricas apresentadas, as mais antigas são as de Thornthwaite e de Blaney-Criddle. A fórmula de Thornthwaite foi derivada em uma região de clima temperado continental, no centro e leste dos Estados Unidos, onde apresentou resultados satisfatórios. Em outras partes do globo, contudo, não obteve sucesso. Mesmo assim, o método de Thornthwaite ganhou popularidade mundial, menos pela sua precisão e universalidade e mais pelo fato de requerer somente dados de temperatura, que, juntamente com a precipitação, são as informações meteorológicas mais disponíveis em todo o globo. Não obstante, o método de Thornthwaite é, ainda hoje, uma alternativa válida para áreas onde existam somente dados de temperatura.

A fórmula de Blaney-Criddle apresenta limitações semelhantes a de Thornthwaite, pois também é fundamentada na temperatura do ar. A única possível melhora da fórmula de Blaney-Criddle foi a inclusão de um coeficiente de uso consuntivo, que deve ser determinado localmente. Segundo Chang (1968), esta fórmula foi, e ainda é, muito usada para estimativa de evapotranspiração nas regiões semi-áridas do oeste dos Estados Unidos. À exceção do clima semi-árido americano, as estimativas por esse método são, em geral, ruins. No Brasil, é utilizada principalmente nas Regiões Centro-Oeste e Nordeste.

Tanto a fórmula de Thornthwaite como a de Blaney-Criddle só devem ser usadas para períodos longos (mensal ou estacional).

Os métodos empíricos baseados na radiação, quer na radiação global (**R_s**) ou no saldo de radiação (**R_n**), são mais promissores, pois fundamentam-se na realidade física de que a energia requerida para a evaporação ou evapotranspiração, mesmo em regiões áridas, provém da radiação. Devido à alta correlação encontrada entre radiação, especialmente saldo de radiação, e evapotranspiração, estes métodos são mais corretos para estimativas para períodos curtos.

A fórmula de Penman apresenta boa precisão, porém, exige a determinação de grande número de dados meteorológicos, que normalmente não estão disponíveis nos postos meteorológicos comuns. A medição da velocidade do vento a 2 m de altura deveria envolver um coeficiente de correção para rugosidade, baseado no tipo e altura da vegetação. Os cálculos para determinar **R_n** e **E_a** são trabalhosos, embora esse problema esteja parcialmente superado com o desenvolvimento das técnicas de computação. Os cálculos de **R_s** e **R_n** baseiam-se na relação n/N e na radiação que chega no topo da atmosfera. O próprio Penman pontificou que as relações dependem de uma distribuição casual de insolação durante o dia. Como resultado, a fórmula não deveria ser usada para curtos períodos de tempo. Há uma relação entre a precisão dos resultados e o período de tempo das estimativas, existindo evidências

condições de aridez ou semi-aridez, pois não leva em conta o efeito da energia advectiva.

A fórmula de Penman sofreu evoluções ao longo do tempo visando sua sensibilidade e precisão, podendo-se eleger a da FAO modificada e a de Penman-Monteith para serem utilizadas em estudos mais acurados.

Exemplo de Comparação entre as Fórmulas

Para fins de determinação do consumo d'água com vista ao planejamento da irrigação, são desejáveis soluções simples que, embora não tão acuradas, dêem resultados dentro de limites nos quais outras práticas de irrigação estejam submetidas. Neste contexto, comparou-se, para as condições de Santo Antônio de Goiás (GO), a evapotranspiração estimada pelo tanque Classe A (ET_0) com a calculada pelas nove fórmulas descritas anteriormente. Informações sobre este estudo comparativo são detalhadas a seguir.

Na fórmula de Blaney-Criddle, o coeficiente de uso consuntivo (K) foi considerado igual a 1. Utilizaram-se valores médios mensais dos parâmetros meteorológicos (Figuras 6 e 7) obtidos na estação meteorológica do Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (CNPAF), cujas coordenadas geográficas são: $16^{\circ}38'S$, de latitude; $49^{\circ}17'W$, de longitude; e 823 m de altitude. O período considerado abrangeu de 1978 a 1993. Ao correlacionar os dados de temperatura média, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar com os de evaporação do tanque Classe A, verificou-se que esta foi mais influenciada pela umidade relativa e pela velocidade do vento. Os coeficientes de correlação foram respectivamente iguais a 0,06, $-0,80^{**}$, $0,92^{**}$ e $-0,19$.

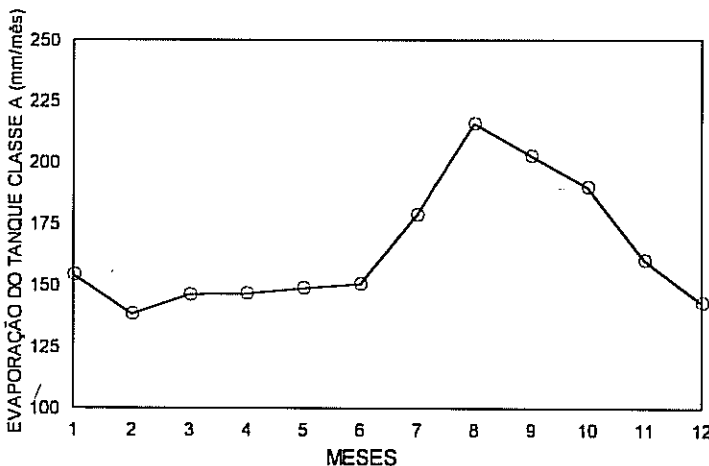


FIG. 6. Valores médios mensais da evaporação do tanque USWB Classe A, obtidos na estação meteorológica do CNPAF, em Santo Antônio de Goiás (GO), no período de 1978 a 1993.

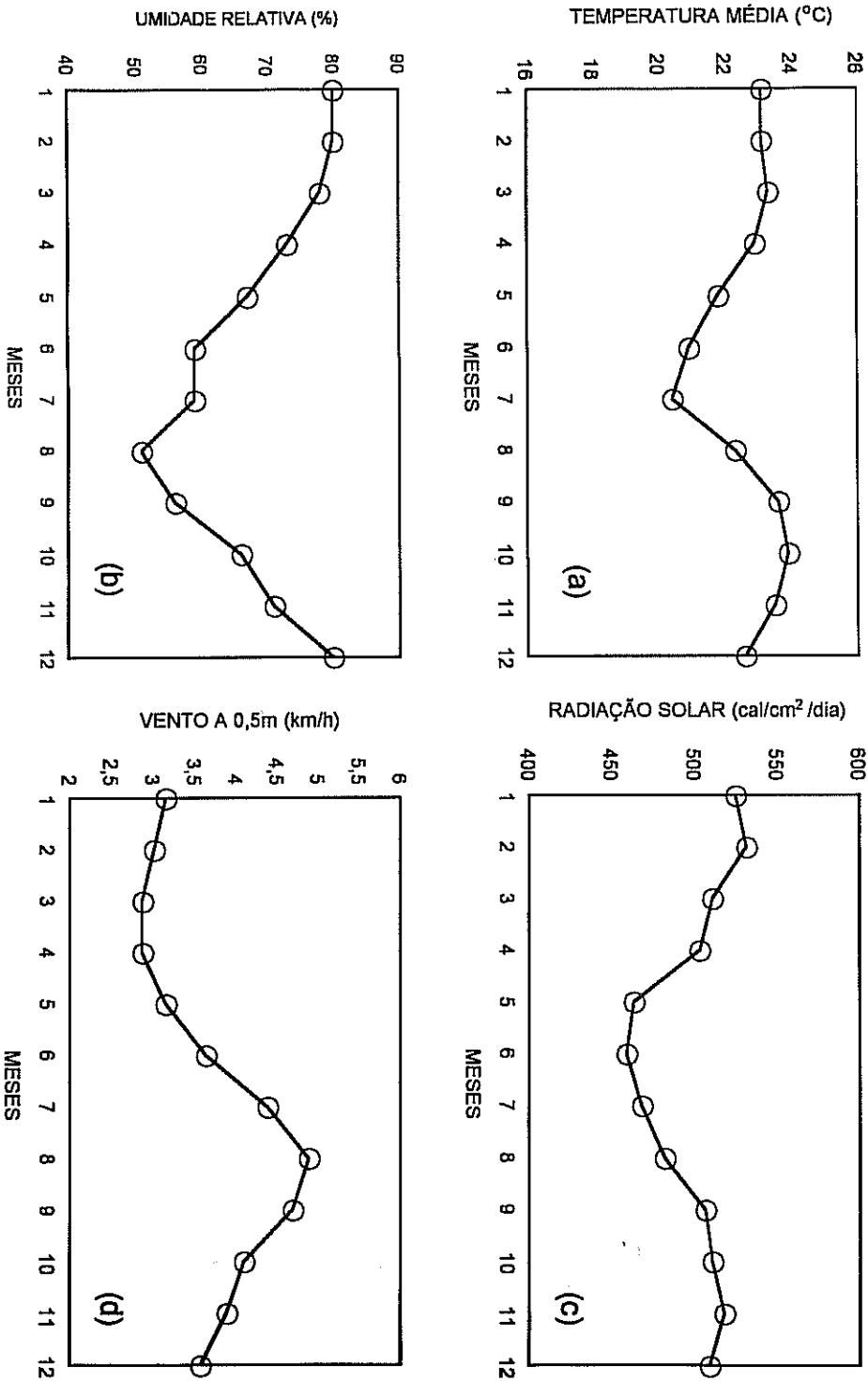


FIG. 7. Valores médios da temperatura média do ar, da umidade relativa, da radiação solar e da velocidade do vento a 0,5 m e altura, obtidos na estação meteorológica do CNPAF, em Santo Antônio de Goiás (GO), no período de 1978 a 1983.

Na Figura 8a verifica-se grande discrepância entre a evapotranspiração calculada pelas fórmulas de Thornthwaite e de Blaney-Criddle e a estimada pelo Tanque Classe A, o que já era esperado, pois estas fórmulas são baseadas na temperatura média mensal e como esta, ao longo do ano, varia pouco na região considerada, outros parâmetros devem ser considerados. Os valores de evapotranspiração obtidos com o uso da fórmula de Blaney-Morin, que considera a umidade relativa, ficaram sempre abaixo dos estimados com o tanque (Figura 8b), entretanto, apresentaram um comportamento similar, sugerindo que com a utilização de um fator de ajuste poder-se-ia adequá-la. A evapotranspiração calculada pelas fórmulas de Hargreaves (Figura 8b) e de Garcia-Lopez (Figura 8c), que também consideram a umidade relativa, ajusta-se mais à estimada pelo tanque, especialmente à fórmula de Garcia-Lopez. Tanto as fórmulas de Jensen-Haise e Turc (Figuras 8c e 8d), baseadas na radiação solar global e temperatura, como a de Priestley-Taylor, baseada no saldo de radiação, calculam valores de evapotranspiração que não se ajustam aos estimados pelo tanque. A fórmula de Penman, a mais complexa, é a que melhor se ajusta aos valores estimados pelo tanque (Figura 9a). Isto está explícito na Tabela 15, onde são apresentados os coeficientes de correlação (r) entre a evapotranspiração calculada pelas diferentes fórmulas e a estimada pelo tanque Classe A, considerando o ano todo e o período seco (abr.-set.). Verifica-se, nesta tabela, que a fórmula de Penman e aquelas que consideram a umidade relativa (Blaney-Morin, Hargreaves e Garcia-Lopez) apresentaram valores significativos de r , tanto para o ano todo como para o período seco.

TABELA 15. Coeficiente de correlação (r) entre a evapotranspiração calculada por diferentes fórmulas e a estimada pelo tanque Classe A.

| Fórmula | Coeficiente de correlação | |
|------------------|---------------------------|-----------|
| | 12 meses | abr.-set. |
| Thornthwaite | 0,29 | 0,52 |
| Blaney-Criddle | 0,21 | 0,62 |
| Blaney-Morin | 0,77** | 0,85* |
| Hargreaves | 0,58* | 0,80* |
| Garcia-Lopez | 0,83** | 0,88* |
| Jensen-Haise | 0,32 | 0,58 |
| Turc | 0,32 | 0,64 |
| Penman | 0,88** | 0,92** |
| Priestley-Taylor | -0,04 | 0,19 |

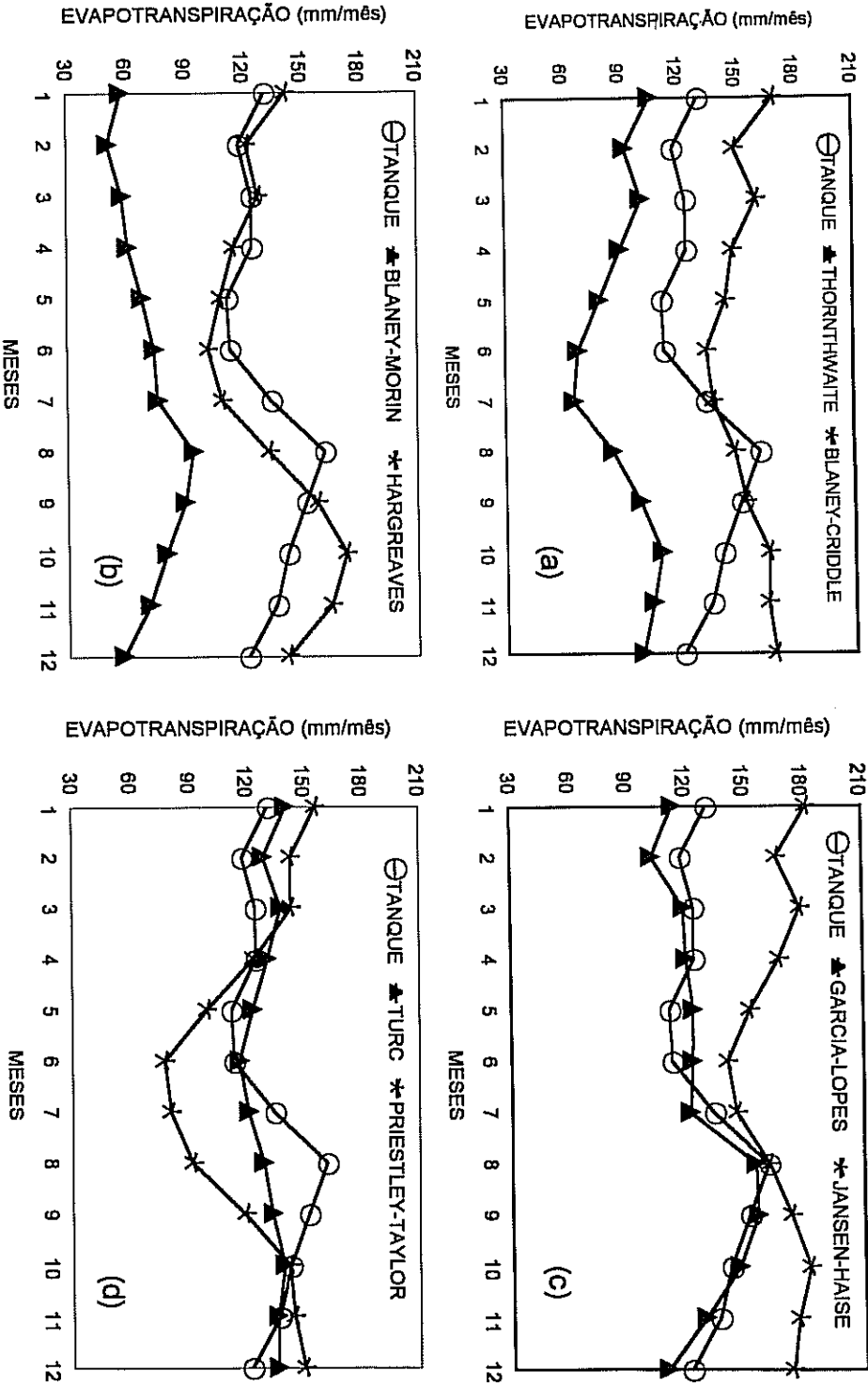


FIG. 8. Valores médios mensais da evapotranspiração calculada por diversas fórmulas e da estimada pelo tanque USWB Classe A, para Santo Antônio de Goiás (GO), no período de 1978 a 1993.

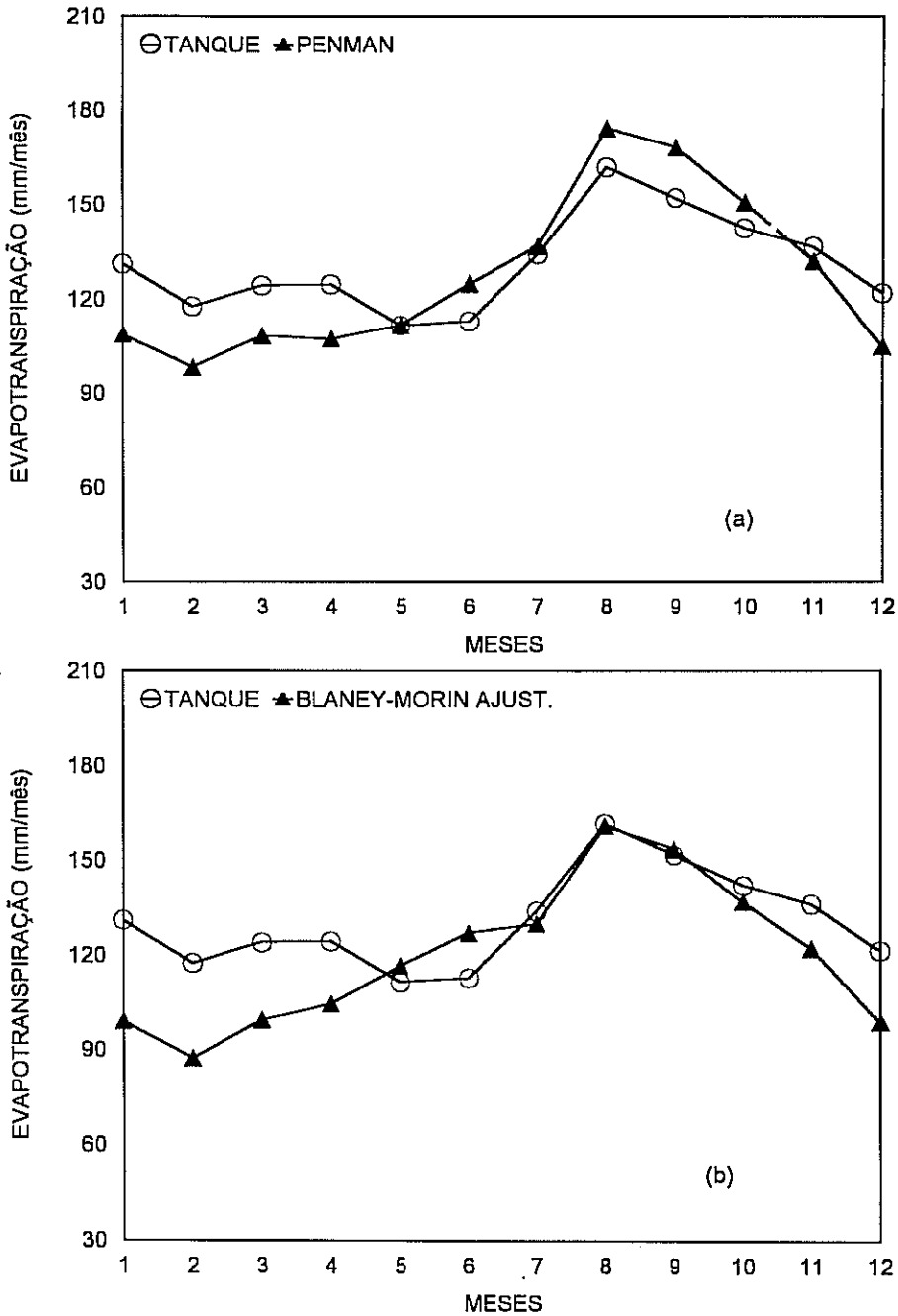


FIG. 9. Valores médios mensais da evapotranspiração calculada pelas fórmulas de Penman e de Blaney-Morin ajustada e da estimada pelo tanque USWB Classe A para Santo Antônio de Goiás (GO), no período de 1978 a 1993.

Entre as fórmulas mais simples, destaca-se a de Garcia-Lopez, na qual são utilizados apenas dados de temperatura média mensal e umidade relativa. Considerando que o segundo maior coeficiente de correlação foi obtido por esta fórmula, pode-se aplicá-la no cálculo da evapotranspiração máxima das culturas para fins de planejamento da irrigação na região de abrangência da estação meteorológica do CNPAF. Para as condições do estudo, encontrou-se um fator de ajuste igual a 1,718 para a fórmula de Blaney-Morin. Na Figura 9b são comparados os valores médios mensais da evapotranspiração calculada por esta fórmula ajustada com os da estimada pelo tanque.

5. COEFICIENTE DE CULTURA

A evapotranspiração máxima de uma cultura medida em um determinado local é função, basicamente, das condições meteorológicas ocorridas durante o desenvolvimento das plantas. As características de crescimento e desenvolvimento das plantas, que estão naturalmente associadas ao tipo de solo, fertilidade do solo, época de semeadura, cultivar utilizada e práticas culturais, entre outros, também exercem influência sobre o consumo de água. No entanto, os fatores preponderantes são aqueles relacionados com a demanda evaporativa da atmosfera. O consumo de água, portanto, determinado em condições específicas de um determinado local, ano e época de semeadura, não pode ser extrapolado para outras condições em valores absolutos. Para que se tenha condições de estimar a necessidade hídrica de uma cultura em uma condição específica, é necessário determinar coeficientes, denominados geralmente "coeficientes de cultura", através da relação entre a evapotranspiração máxima medida a campo e alguns elementos meteorológicos ou fórmulas de estimativa de evaporação ou evapotranspiração.

Embora com certa similaridade física, o processo de evaporação não é idêntico ao da evapotranspiração, pois mesmo com total abertura estomática a resistência à difusão do vapor d'água é maior na superfície das folhas do que numa superfície livre de água. Por outro lado, o balanço de energia e a rugosidade aerodinâmica das superfícies de água diferem das vegetadas. No entanto, os elementos meteorológicos exercem influência semelhante sobre a evaporação de superfície de água, superfície do solo e sobre a transpiração de superfícies vegetadas. Diversos trabalhos mostram que a evapotranspiração de plantas, em períodos de plena vegetação e sem deficiência de umidade, está correlacionada positiva e significativamente com a evaporação da superfície de água livre. Entre os instrumentos meteorológicos empregados para estimar a evaporação da superfície de água livre, o tanque de evaporação USWB Classe A tem sido o mais utilizado.

Como mencionado anteriormente, por meio da evaporação do tanque (ECA) estima-se o ET_0 . Assim:

$$ET_0 = ECA \times K_p \quad (29)$$

onde K_p é o coeficiente do tanque.

A relação entre ET_m e a ET_o é o coeficiente de cultura (Kc), cuja aplicação é mais generalizada do que a simples medição do consumo d'água por uma cultura em um dado local e num dado ano. Com os dados de evaporação do tanque USWB Classe A (média de vários anos) de um dado local e com o Kc da cultura, pode-se estimar a demanda d'água, ou seja:

$$ET_m = ET_o \times Kc \quad (30)$$

Para culturas anuais, o valor de Kc aumenta desde a emergência até a cobertura total do solo, decrescendo, após, até a maturação e colheita. Steinmetz (1984, 1986), utilizando lisímetro para medir a ET_m e tanque USWB Classe A para estimar a ET_o , determinou os valores de Kc para diferentes estádios das culturas do feijoeiro (Tabela 16) e do arroz (Tabela 17).

TABELA 16. Coeficiente de cultura (Kc) para três estádios da cultura do feijoeiro.

| Estádio da Cultura | Duração (dia) | Idade da Planta (dia) | Kc |
|---------------------------------------|------------------|--------------------------|------|
| Germinação ao início da floração | 35 | 0-35 | 0,69 |
| Floração | 25 | 36-60 | 1,28 |
| Desenvolvimento de vagens à maturação | 20 | 61-80 | 1,04 |

Fonte: Steinmetz (1984).

TABELA 17. Coeficiente de cultura (Kc) para diferentes estádios da cultura do arroz de sequeiro.

| Estádio da Cultura | Idade da Planta (dia) | Kc |
|---------------------------------|--------------------------|------|
| Plântula | 8-18 | 0,70 |
| Vegetativa | 18-40 | 0,90 |
| Final da vegetativa-reprodutiva | 40-110 | 1,24 |
| Enchimento dos grãos | 110-130 | 0,90 |

Fonte: Steinmetz (1986).

Na Tabela 18 são apresentados coeficientes de cultura (Kc) determinados em outros países para plantas diversas, compilados por Doorenbos & Kassam (1979).

TABELA 18. Coeficientes de cultura (Kc) determinados para diversas plantas em vários estádios de desenvolvimento.

| Cultura | Estádio de Desenvolvimento da Cultura* | | | | | Período Total de Crescimento* |
|-----------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------|
| | (I) | (II) | (III) | (IV) | (V) | |
| Alfafa | 0,3-0,4 | | | | 1,05-1,2 | 0,85-1,05 |
| Algodão | 0,4-0,5 | 0,7-0,8 | 1,05-1,25 | 0,8-0,9 | 0,65-0,7 | 0,8-0,9 |
| Amendoim | 0,4-0,5 | 0,7-0,8 | 0,95-1,1 | 0,75-0,85 | 0,55-0,6 | 0,75-0,8 |
| Arroz | 1,1-1,15 | 1,1-1,5 | 1,1-1,3 | 0,95-1,05 | 0,95-1,05 | 1,05-1,2 |
| Banana | | | | | | |
| tropical | 0,4-0,5 | 0,7-0,85 | 1,0-1,11 | 0,9-1,0 | 0,75-0,85 | 0,7-0,8 |
| subtropical | 0,5-0,65 | 0,8-0,9 | 1,0-1,2 | 1,0-1,15 | 1,0-1,15 | 0,85-0,95 |
| Batata | 0,4-0,5 | 0,7-0,8 | 1,05-1,2 | 0,85-0,95 | 0,7-0,75 | 0,75-0,9 |
| Beterraba | 0,4-0,5 | 0,75-0,85 | 1,05-1,2 | 0,9-1,0 | 0,6-0,7 | 0,8-0,9 |
| Cana-de-açúcar | 0,4-0,5 | 0,7-1,0 | 1,0-1,3 | 0,75-0,8 | 0,5-0,6 | 0,85-1,05 |
| Cebola | | | | | | |
| seca | 0,4-0,6 | 0,7-0,8 | 0,95-1,1 | 0,85-0,9 | 0,75-0,85 | 0,8-0,9 |
| verde | 0,4-0,6 | 0,6-0,75 | 0,95-1,05 | 0,95-1,05 | 0,95-1,05 | 0,65-0,8 |
| Citros | | | | | | |
| com controle de ervas | | | | | | 0,65-0,75 |
| sem controle | | | | | | 0,85-0,9 |
| Ervilha (fresca) | 0,4-0,5 | 0,7-0,85 | 1,05-1,2 | 1,0-1,15 | 0,95-1,1 | 0,8-0,95 |
| Feijão | | | | | | |
| vagem | 0,3-0,4 | 0,65-0,75 | 0,95-1,05 | 0,9-0,95 | 0,85-0,95 | 0,85-0,9 |
| p/a grãos | 0,3-0,4 | 0,7-0,8 | 1,05-1,2 | 0,65-0,75 | 0,25-0,3 | 0,7-0,8 |
| Fumo | 0,3-0,4 | 0,7-0,8 | 1,0-1,2 | 0,9-1,0 | 0,75-0,85 | 0,85-0,95 |
| Girassol | 0,3-0,4 | 0,7-0,8 | 1,0-1,2 | 0,7-0,8 | 0,35-0,45 | 0,75-0,85 |
| Melancia | 0,4-0,5 | 0,7-0,8 | 0,95-1,05 | 0,8-0,9 | 0,65-0,75 | 0,75-0,85 |
| Milho | | | | | | |
| verde | 0,3-0,5 | 0,7-0,9 | 1,05-1,2 | 1,0-1,15 | 0,95-1,1 | 0,8-0,95 |
| grãos | 0,3-0,5 | 0,8-0,85 | 1,05-1,2 | 0,8-0,95 | 0,55-0,6 | 0,75-0,9 |
| Pimenta (fresca) | 0,3-0,4 | 0,6-0,75 | 0,95-1,1 | 0,85-1,0 | 0,8-0,9 | 0,7-0,8 |
| Repolho | 0,4-0,5 | 0,7-0,8 | 0,95-1,1 | 0,9-1,0 | 0,8-0,95 | 0,7-0,8 |
| Soja | 0,3-0,4 | 0,7-0,8 | 1,0-1,15 | 0,7-0,8 | 0,4-0,5 | 0,75-0,9 |
| Sorgo | 0,3-0,4 | 0,8-0,75 | 1,0-1,15 | 0,75-0,8 | 0,5-0,55 | 0,75-0,85 |
| Tomate | 0,4-0,5 | 0,7-0,8 | 1,05-1,25 | 0,8-0,95 | 0,6-0,65 | 0,75-0,9 |
| Trigo | 0,3-0,4 | 0,7-0,8 | 1,05-1,2 | 0,65-0,75 | 0,2-0,25 | 0,8-0,9 |
| Videira | 0,35-0,55 | 0,6-0,8 | 0,7-0,9 | 0,6-0,8 | 0,55-0,7 | 0,55-0,75 |

* Primeiro número: sob alta umidade ($UR_{min} > 70\%$) e vento fraco ($V < 5$ m/s). Segundo número: sob baixa umidade ($UR_{min} < 20\%$) e vento forte ($V > 5$ m/s).

Fonte: Doorenbos & Kassam (1979).

Como exemplo de aplicação do conceito de K_c , construiu-se a Tabela 19, considerando os valores da evapotranspiração de referência estimada pelo tanque Classe A (média do período de 1978 e 1993), obtidos na estação meteorológica do CNPAF, e os coeficientes K_c determinados por Steinmetz (1984), conforme Tabela 16. Na Tabela 19 são apresentados os valores máximos de consumo de água de uma cultivar de feijoeiro irrigado, com 80 dias de ciclo, conforme o mês de semeadura. Observa-se que à medida que a semeadura é feita mais tarde (a partir de abril), o consumo de água aumenta. O equipamento de irrigação deve ser projetado para fornecer uma lâmina líquida de 6,7 mm/dia para atender datas de semeadura de abril a agosto.

TABELA 19. Evapotranspiração máxima (ET_m) do feijoeiro, conforme o mês de semeadura, em Santo Antônio de Goiás (GO).

| Mês de semeadura | ET_m (mm/dia) | | | | | | | ET_m ciclo (mm) |
|------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|-------------------|
| | abr. | maio | jun. | jul. | ago. | set. | out. | |
| abr. | 2,9 | 4,6 | 3,9 | | | | | 294,5 |
| maio | | 2,5 | 4,8 | 4,5 | | | | 297,5 |
| jun. | | | 2,6 | 5,5 | 5,4 | | | 336,5 |
| jul. | | | | 3,0 | 6,7 | 5,3 | | 378,5 |
| ago. | | | | | 3,6 | 6,5 | 4,8 | 384,5 |

Existem, na literatura, algumas variações entre os valores de K_c estabelecidos para uma dada cultura. Isto ocorre devido, possivelmente, à cultivar utilizada e às práticas culturais, especialmente adubação e densidade de semeadura. Para fins de planejamento de irrigação, entretanto, estas variações não são tão importantes. Por outro lado, quando se modifica abruptamente o sistema de produção de uma cultura, o K_c deve ser ajustado a esta nova situação. Stone & Pereira (1994), trabalhando com arroz de sequeiro sob irrigação suplementar por aspersão, verificaram que os valores de K_c foram alterados significativamente devido ao aumento na adubação e redução no espaçamento tradicional, de 50 cm para 20 cm entrelinhas. Além disto, o uso de cultivares de menor porte e com folhas mais eretas que as das cultivares tradicionais de arroz de sequeiro também afetou o K_c . Pelas Figuras 10 e 11, pode-se verificar que este comportamento esteve correlacionado ao efeito da área foliar sobre o K_c , e ainda que, dependendo do índice de área foliar, a variação no valor de K_c pode atingir até 50%.

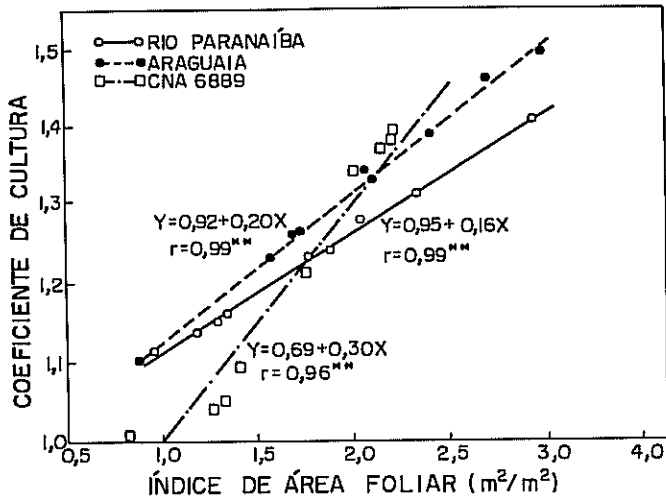


FIG. 10. Coeficiente de cultura de cultivares/linhagens de arroz em função do índice de área foliar, no período compreendido entre 43 e 57 dias após a emergência. Adaptado de Stone & Pereira (1994).

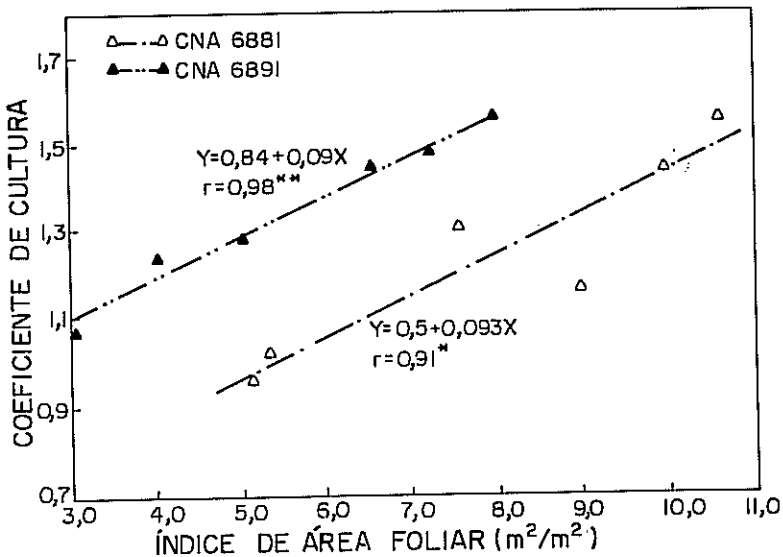


FIG. 11. Coeficiente de cultura de linhagens de arroz em função do índice de área foliar, no período compreendido entre 60 e 75 dias após a emergência. Adaptado de Stone & Pereira (1994).

No estágio inicial de desenvolvimento das culturas, quando as plantas cobrem menos que 10% da superfície do solo, podem ocorrer grandes variações no valor de K_c devido à frequência das chuvas ou irrigações. A evaporação pode ser muito significativa se as chuvas ou irrigações forem muito frequentes, mantendo a superfície do solo úmida durante a maior parte do tempo. Na Figura 12 são apresentados valores médios de K_c para o estágio inicial em função da evapotranspiração potencial e da frequência de irrigação ou chuva significativa.

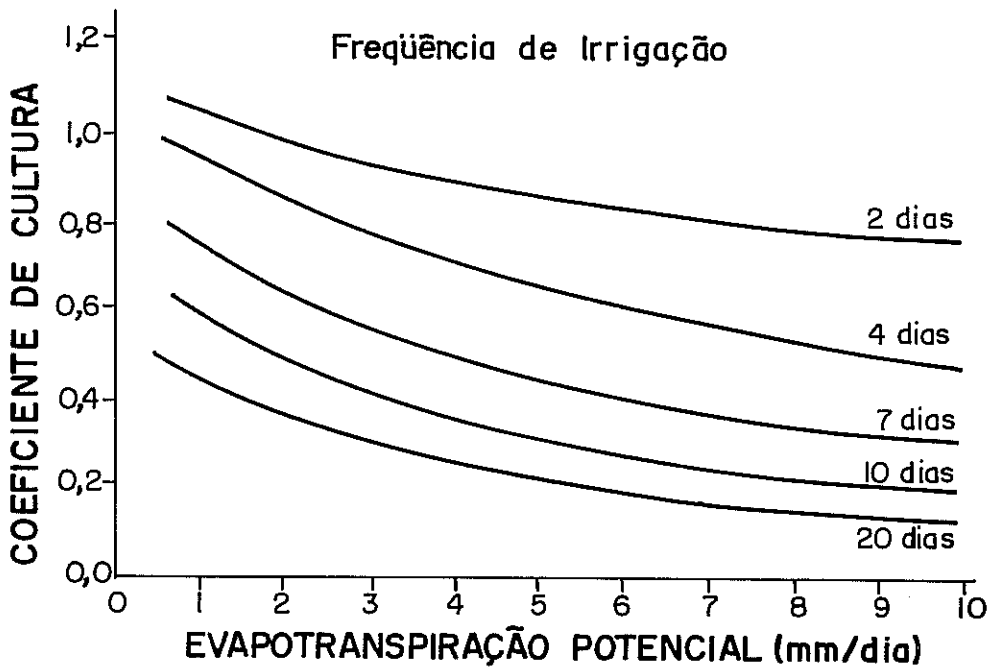


FIG. 12. Valor médio do coeficiente de cultura para o estágio inicial em função da evapotranspiração potencial durante este estágio e da frequência de irrigação ou chuva significativa. Adaptado de Ometto (1981).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERLATO, M.A.; MOLION, L.C.B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1981. 95p. (IPAGRO. Boletim Técnico, 7).
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa: UFV, 1982. 463p.
- 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**, Campinas, v.5, n.1, p.1-6, 1981.
- CHANG, Jen-Hu. **Climate and agriculture: an ecological survey**. Chicago: Aldine, 1968. 304p.
- 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. 43, n.5, p.385-390, 1962.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efectos del agua en el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212p. (Estudio FAO. Riego & Drainage, 33).
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Las necesidades de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 1976. 194p. (Estudio FAO. Riego & Drainage, 24).
- FONTANA, D.C. Determinação da evapotranspiração. In: BERGAMASCHI, H. (Coord). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1990. p.48-68.
- HARGREAVES, G.H. **Potential evapotranspiration and irrigation requirements for Northeast Brazil**. Logan: Utah State University, 1974. 54p.
- HILLEL, D.; KREBTOV, V.D.; STYLIANOV, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics *in situ*. **Soil Science**, Baltimore, v.114, p.395-400, 1972.
- KLAR, A.E. **Irrigação: frequência e quantidade de aplicação**. São Paulo: Nobel, 1991. 156p.
- LOBATO, O.J. da S.; LOBATO, E.J.V. Considerações sobre a evapotranspiração potencial medida e calculada no município de Goiânia e circunvizinhos. **Anais da Escola de Agronomia e Veterinária**, Goiânia, v.9, n.1, p.50-73, 1979.

- LOBATO, O.J. da S.; LOBATO, E.J.V.; GONÇALVES, V.A. Contribuição ao estudo da radiação solar global e da insolação na micro-região do Mato Grosso de Goiás. *Anais da Escola de Agronomia e Veterinária, Goiânia*, v.12/13, n.1, p.69-89, 1982/83.
- MATZENAUER, R. Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficiente de cultura. In: BERGAMASCHI, H. (Coord). *Agrometeorologia aplicada à irrigação*. Porto Alegre: UFRGS, 1990. p.27-47.
- MOREIRA, H.J. da C. S.A.A.C.I. - *Sistema agroclimatológico para o acompanhamento das culturas irrigadas: manual prático para o manejo da irrigação*. Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação, 1993. 86p.
- OMETTO, J.C. *Bioclimatologia vegetal*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440p.
- SHARMA, M.L. Estimating evapotranspiration. In: HILLEL, D. (Ed). *Advances in irrigation*. Orlando: Academic Press, 1985. v.3. p. 213-281.
- SILVEIRA, P.M. da; STONE, L.F. Balanço de água na cultura do feijão em latossolo vermelho-amarelo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília*, v.14, n.2, p.111-115, 1979.
- STEINMETZ, S. *Evapotranspiração máxima no cultivo do feijão de inverno*. Goiânia: EMBRAPA-CNPAF, 1984. 4p. (EMBRAPA-CNPAF. Pesquisa em Andamento, 47).
- STEINMETZ, S. *Estudos agrometeorológicos na cultura do arroz*. Goiânia: EMBRAPA-CNPAF, 1986. 11p. (EMBRAPA. PNP de Arroz. Projeto 00180002/8). Relatório Final.
- STONE, L.F.; PEREIRA, A.L. Sucessão arroz-feijão irrigados por aspersão: efeitos de espaçamento entre linhas, adubação e cultivar no crescimento, desenvolvimento radicular e consumo d'água do arroz. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília*, v. 29, n.10, p.1577-1592, 1994.
- TANNER, C.B. Measurement of evapotranspiration. *Agronomy, Madison*, v.11, p.534-574, 1967.
- WARD, R.C. *Principles of hydrology*. London: McGraw Hill, 1975. 367p.
- WITHERS, B.; VIPOND, S. *Irrigation: design and practice*. London: B.T. Batsford, 1974. 306p.