

I Curso de Uso e Manejo da Irrigação

FOL.3067
1986
FL-PP-FOL.3067

Evapotranspiração.

1986

FL-PP-FOL.3067



CNPMS-15117-1

CNPMS, 10 anos
pesquisando para o produtor
————— 1976-86 —————



MINISTÉRIO DA AGRICULTURA — MA

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária — EMBRAPA

Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo — CNPMS

Sete Lagoas — MG

EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Luis Marcelo A. Sans

INTRODUÇÃO

Medições precisas de evapotranspiração são básicas nas culturas, avaliação da severidade de stress de água, estudos em hidrologia e desenvolvimento de modelos de produção de culturas.

Dentre os vários aspectos relacionados com a importância de se conhecer o consumo de água por uma cultura, dois salientam-se. O primeiro, diz respeito ao fator econômico. Para uma grande parte das regiões brasileiras, irrigação é hoje um manifesto. A maior preocupação das instituições governamentais, na tomada de decisões quanto a alocação de recursos de água para irrigação e do fazendeiro, individualmente, é com respeito à relação custo/benefício e o manejo adequado da irrigação. Os custos para ambos - a sociedade e o produtor - são de diferentes tipos e magnitudes. Dentre os custos um dos que mais salientam é o da energia. A energia despendida na aplicação de água em excesso, aliado à perda de fertilizantes por lixiviação, é um dos fatores que tem contribuído grandemente com a redução dos lucros. O segundo aspecto é com relação à planta propriamente dita. A planta tem que se beneficiar com a suplementação de água a ser aplicada pela irrigação. O excesso causa danos (deficiência de oxigênio, perdas de nutriente) tanto quanto a deficiência, provocando um custo de produção mais alto. Dai a necessidade de se conhecer o nível ideal de água para uma cultura, para uma dada condição ambiental, o que se pode determinar quando se tem informações básicas acerca da interação solo-planta-clima, sendo a evapotranspiração o parâmetro mais importante.

Embora os princípios básicos que determinam a necessidade de água por uma cultura aplicam-se tanto para regiões áridas como úmidas, o manejo de irrigação difere bastante entre diferentes condições climáticas. Portanto, a transferência de tecnologia implica numa avaliação da mesma na região onde será utiliza-

da. Por exemplo, apesar dos diversos métodos para estimar a evapotranspiração, nenhum deles tem sido utilizados de forma generalizada, pois diferem entre si não somente quanto a conveniência e custos mas, também, quanto a precisão.

Considerando que este curso tem como principal objetivo fornecer alternativas que possam contribuir para a resolução de problemas existentes, e que possam ocorrer em sistemas de agricultura irrigada, iremos fazer uma análise dos métodos existentes de determinar a evapotranspiração, tentando focalizar, principalmente, suas limitações e viabilidade de utilização sem entrar em fundamentos teóricos. Desta forma, tentar-se-á fornecer alternativas para determinar a evapotranspiração para que se possa estabelecer o requerimento de água das culturas.

Numa tentativa de tornar as aulas menos tediosas e cansativas, vamos dividi-las em teóricas e práticas, na seguinte sequência:

1. Alguns conceitos básicos
2. Coeficiente cultural
3. Determinação de evapotranspiração
 - . Direta
 - . Métodos micrometeorológicos
 - . Métodos empíricos
4. Balanço hídrico

1. Conceitos Básicos

Evapotranspiração (ET): Foi definida por THORNTHWAITE (1948) como sendo o somatório da quantidade de água evaporada pela superfície do solo e transpirada pelas plantas. TANNER (1967) generalizou mais o termo, definindo-o como sendo a conversão da água líquida existente na superfície da terra para a forma de vapor e sua mistura com a atmosfera.

Uso consuntivo: é a quantidade de água de evaporação e de constituição dos vegetais.

Evapotranspiração potencial (ETP): é a quantidade de água transpirada na unidade de tempo por uma cultura de porte baixo em crescimento ativo, cobrindo completamente o solo, com altura uniforme e nunca com deficiência de água (PENMAN, 1956).

Evapotranspiração máxima (ETmax): é a evapotranspiração que ocorrerá se a vegetação é bem abastecida de água e a superfície do solo está molhada. É como se tivesse um abastecimento constante de água para a planta (TANNER & JURY, 1976).

Evapotranspiração real ou atual (ETr ou ETa): é a evaporação que está ocorrendo num dado momento, ou seja, é a ET sem uma das condições limitantes da ETP.

Índice de área foliar: é a relação entre a área foliar total e a superfície do solo coberta pela mesma.

Coefficiente cultura (Kc): é o coeficiente utilizado para relacionar a evapotranspiração da cultura com a evapotranspiração de referência. O valor de Kc representa a evapotranspiração de uma cultura crescendo sob ótimas condições, originando ótimas produções.

Radiação global (Rg): é o somatório da radiação solar direta (Rs) e a radiação difusa (Rd) da atmosfera.

$$R_g = R_s + R_d \quad (1)$$

A radiação global refletida pode ser expressa como:

$$R_k = r R_g \quad (2)$$

onde "r" é o que denomina-se albedo da superfície, que nada mais é que a refletância para a radiação solar global.

A medição tanto de Rg como de Rk é feita através de piranômetro.

2. Coefficiente cultural (kc)

Dentre os vários fatores que afetam o coeficiente cultural os mais importantes são: características da cultura, época de plantio ou sementeira, taxa de desenvolvimento e crescimento das plantas, e comprimento do ciclo da cultura, que é função das condições climáticas dominantes durante o ciclo. Conseqüentemente, para uma mesma cultivar haverá diferentes coeficientes culturais, dependendo da taxa de desenvolvimento das plantas. A Figura 1 mostra claramente diferentes curvas para diferentes épocas de cultivo.

Os valores de Kc dependem grandemente da taxa de evapotranspiração potencial ou de referência e da frequência em que o solo é molhado por precipitação ou irrigação. Também o vento e a umidade são parâmetros muito importantes, principalmente em climas secos.

O estabelecimento do coeficiente cultural é, geralmente, feito por meio da equação:

$$E_{tr} = K_c E_{to} \quad (3)$$

onde:

E_{tr} = evapotranspiração real ou atual

E_{to} = evapotranspiração de referência

O que se tem feito (DOORENBOS E PRUITT, 1977) é subdividir o ciclo da cultura em 4 estádios que são:

- . Estádio inicial - consiste no período que vai da germinação até que a cobertura do solo pelo dossel seja inferior a 10%.
- . Estádio de desenvolvimento - inicia quando a cobertura do solo é de 10% e termina quando esta cobertura está entre 70-80% (cobertura total).
- . Estádio meia-estação - inicia-se no limite superior do estágio anterior até o início da maturação.
- . Estádio final - vai da maturação até a colheita.

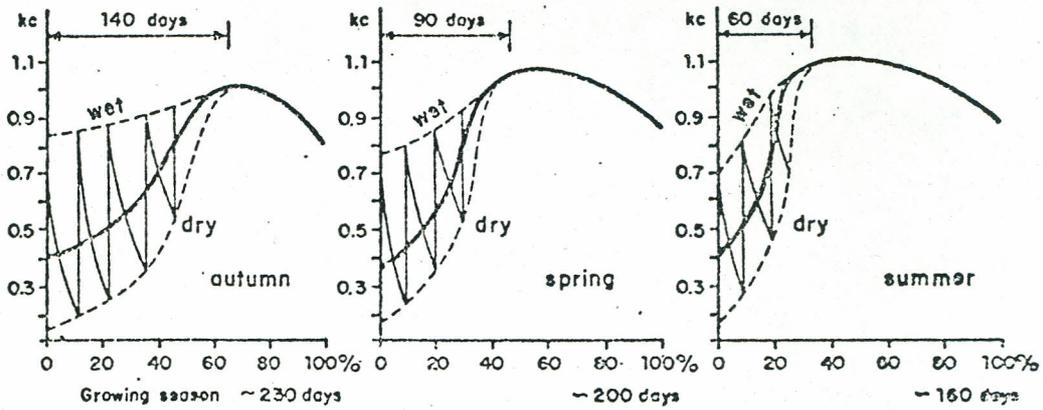
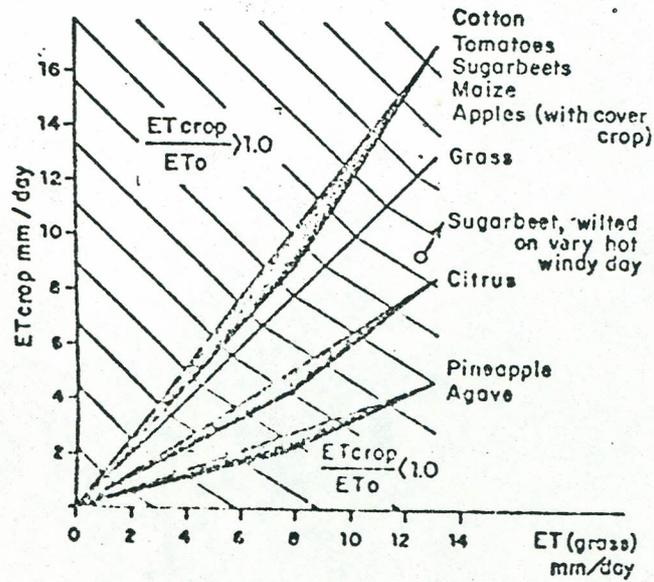


FIGURA 1. Variação do Kc com a cultura e época de plantio.
 (Fonte: DOORENBOS & PRUITT, 1975).

A metodologia proposta por estes autores será melhor discutida através da determinação dos K_c na parte prática a ser desenvolvida.

Um método teórico que pode ser utilizado é através da equação:

$$K_c = \frac{E_{Tr}}{E_{Tp}} = \frac{\Delta + \delta}{\Delta + \delta \left(1 - \frac{r_i}{r_a}\right)} \quad (4)$$

onde:

Δ é a taxa de variação da depressão de vapor com temperatura (mbar/ $^{\circ}$ K)

δ = constante psicrométrica (mbar/ $^{\circ}$ K)

r = resistências à difusão de vapor (dia/m)

Um método experimental, consiste em selecionar duas áreas de aproximadamente 50 x 50 m com 20 m de bordadura, sendo uma plantada com um cultura de referência e a outra com a desejada. Instala-se em ambas radiômetro e faz-se o balanço de energia. A relação entre o balanço da área com a cultura desejada e o da cultura de referência nos dará o valor de K_c .

JENSEN et alii (1971) determinou os valores de K_c utilizando a equação:

$$K_c = K_{c_0} K_a + K_s \quad (5)$$

sendo:

K_{c_0} = coeficiente que modifica E_{T_0} para cada estágio de crescimento da planta e percentagem da superfície da terra que é coberta pelo dossel

K_a = coeficiente que decresce a ET da cultura à medida que a zona radicular vai secando (varia de 0 a 1)

K_s = coeficiente que aumenta a ET da cultura quando a superfície do solo é molhada (precipitação e/ou irrigação)

Outro método consiste na determinação da E_{Tr} da cultura por meio de lisímetros e, através da equação 3, determinar K_c . O grande problema em utilizar este método é a exigência de um lisímetro de precisão cujo custo é elevadíssimo.

Sumarizando, observa-se que o aumento de precisão na es

timativa do Kc implica em tornar mais complexo o método de determinação, o que, na prática, muitas vezes torna inviável a sua utilização, uma vez que todas as informações requeridas não sejam disponíveis.

3. Determinação da evapotranspiração

TANNER (1967) subdividiu os métodos de determinações da evapotranspiração, de acordo com a conveniência, em três classes, ou seja, métodos baseados em medições micrometeorológicas, métodos empíricos e através de balanço de água.

Métodos micrometeorológicos

Estes métodos se baseiam na redução da densidade de fluxo de vapor d'água na camada limítrofe da atmosfera. São métodos relativamente complexos e, como fogem aos objetivos deste curso, os princípios físicos que governam o fluxo de vapor não serão discutidos, porém, caso haja interesse, os mesmos estão apresentados, em anexo, no trabalho de PENMAN et alii (1967).

Dentre os métodos que se baseiam em terminações micrometeorológicas, TANNER (1967) subdividiu-os em aqueles que se baseiam no perfil de energia, também conhecidos como métodos aerodinâmicos ou transporte de massa, métodos de balanço de energia e métodos que consistem na combinação dos dois primeiros.

Embora os métodos micrometeorológicos apresentem vantagens tais como de determinar a ET para certos períodos de tempo, permitir determinar outros fluxos como os de CO₂ e calor, e fornecer outras informações importantes ao crescimento e desenvolvimento de plantas como temperatura, umidade, luminosidade etc, tem também as limitações de para ou de e como eles possam ser utilizados aliado as dificuldades com relação à instrumentação. Em resumo, são métodos relativamente complexos, que necessitam uma grande quantidade de dados que, para as condições brasileiras, na maioria dos locais são disponíveis.

Métodos empíricos

Muitas fórmulas empíricas relacionando dados climatológicos e evapotranspiração têm sido desenvolvidas e aplicadas com sucesso para um determinado meio ambiente e cultura. De acordo os métodos desenvolvidos podemos agrupá-los em aqueles que se baseiam em radiação, métodos de temperatura, métodos de umidade e evaporímetros.

Um aspecto que deve ser considerado, é com respeito à conservatividade. Nas regiões onde o clima é mais conservativo a ETP é também mais conservativa. Qualquer índice meteorológico que indica uma variação das condições evaporativas auxiliará estimar as variações relativamente pequenas da ETP da média esperada. As estimativas empíricas da ETP são mais precisas à medida em que se aumenta o período de estimativa da ETP média, pois o desvio padrão de parâmetros climatológicos é inversamente proporcional à raiz quadrada do número de dias do período em que está se determinando a média.

Uma vez que a ETP depende mais das condições meteorológicas e menos da vegetação, os métodos empíricos aproximam-se de um valor mais realístico quando calibrados para as condições em que se pretende estimá-la. Esta calibração deve ser feita utilizando-se lisímetros.

Várias fórmulas para estimar ETP tem sido propostas. Dentre elas, aquelas que se baseiam no balanço de radiação são as mais precisas. Nestas, que embora sejam embasadas em princípios físicos, são incluídas aproximações empíricas para que se possa utilizar os dados meteorológicos disponíveis. Se bem calibradas, estas equações podem ter sucesso para estimativas a curto e longo período da ETP.

Um grupo de métodos que tem sido utilizado é aquele que relaciona ETP e radiação diretamente, Vários métodos dentre os propostos serão discutidos na parte prática deste curso.

Dentre os métodos empíricos, os que tem grande utilização são os baseados em temperatura. O amplo uso destes métodos se deve, basicamente, à existência de dados de temperatura em qualquer local e por um longo período. Outro fator que contribui é a simplicidade das equações propostas. Por vezes combinam a temperatura com a umidade relativa.

Alguns métodos utilizados estão apresentados no Quadro 1.

QUADRO 1. Métodos baseados em temperatura, utilizados para estimar a ETP (Fonte: TANNER, 1977).

Fórmula	Tipo de equação	Autor
$ETP = C d_L T (C_2 - C_3 h)$		
$ETP = C d_L T$	linear	Blaney-Criddle
$ETP = 1,6 (10T/I)^a$	não linear	Thorntwaite
$ETP = C d_L (e_{max} - e_{min})$	Temperatura-pressão de vapor	Halstead
$ETP = 0,14 d_L^2 e_{max}$		Hamon

C_1 = constante da cultura, tanque ou outra massa líquida

d_L = comprimento do dia

T = temperatura

C_2, C_3 = constantes

C = coeficiente para o consuntivo uso mensal

I = índice de calor (tabelas)

a = função de I (tabelas)

e_{max}, e_{min} = saturação de umidade absoluta correspondente à máxima e mínima temperatura do ar, respectivamente.

Dentre estes métodos os que ainda hoje são utilizados são os de Thorntwaite e Blaney-Criddle. A fim de avaliar a utilização dos mesmos vamos discutir o de Thorntwaite, cujos comentários aplicam-se também ao de Blaney-Criddle.

O método de Thorntwaite para estimar a evapotranspiração é um dos mais antigos baseados em temperatura ainda em uso. É um método empírico muito simples e requer apenas dados de temperatura média do ar e a latitude do local. A equação proposta pelo autor é a que se segue.

$$EP^* = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (1)$$

onde T, I, a , são temperatura média mensal, índice de calor e constante (função de I), respectivamente; permite estimar a evapotranspiração (EP*) para 12 h de luz/dia e 30 dias. Portanto, é necessário ajustar este valor para as quantidades reais de luz e o número de dias de cada mês.

De acordo com a definição de evapotranspiração potencial (ETP), dada pelo próprio autor, a ETP é limitada apenas pela energia disponível e não pelo suprimento de água. Consequentemente é necessário grande quantidade de energia para que ocorra ETP, devido o elevado calor latente de vaporização. Portanto, a temperatura não é uma medida suficiente de energia para determinar a evapotranspiração.

A evapotranspiração está em fase com a energia disponível, mesmo em termos horários, porém, a temperatura não está em fase com a radiação solar, devido a energia armazenada no solo e advecção. Desta forma a correlação entre temperatura média e radiação líquida diária (e evapotranspiração) é precária. Este efeito de defazagem da temperatura é menor durante períodos em que tanto a temperatura e a radiação líquida são máximas. Geralmente, para nossas condições, estes períodos ocorrem na época em que a maioria das culturas estão em fase de desenvolvimento e crescimento. Portanto, alguma precisão neste período poderá ser alcançada com a utilização deste método.

Embora os métodos para estimar ETP a partir de temperatura do ar estão sujeitos a erros, vários estudos tem mostrado alta correlação entre ETP e temperatura média mensal. Como discutido por PELTON et al (1960) esta alta correlação não serve como argumento para utilizar esta metodologia a menos que haja uma justificativa física razoável. Uma possível explicação é que, tanto ET e T média, variam estacionalmente com a taxa de radiação e como cada um é altamente relacionado com radiação uma boa correlação entre eles é esperada. Porém, qualquer variável periódica que esteja em fase com a radiação mesmo não relacionando com a mesma apresentará alta correlação com ETP.

Com relação à evapotranspiração atual, o limitado sucesso que tem sido alcançado quando ajustada a um dado local e cul-

tura, se deve em parte ao ajustamento estabelecendo a correlação mútua entre radiação, ET e T para um dado regime de umidade e, em parte, devido ao fato de correções quanto a advecção e defazagem de temperatura são introduzidos no ajustamento.

Em resumo, embora o método de Thornthwaite inclua um ajustamento às variações da taxa líquida de radiação com a latitude, ele não considera a quantidade de energia armazenada no solo e o efeito de advecção. Portanto, para que haja algum sucesso na estimativa da ET potencial ou atual a mesma deve ser feita para longos períodos devido à pequena variabilidade de ano para ano da taxa de radiação líquida, ET e temperatura média. Por outro lado, sugere-se que não use métodos de temperatura para curtos períodos; principalmente, em regiões onde o fator advecção é significativo. O que se pode fazer é determinar um fator de correção para curtos períodos mesmo assim são difíceis de serem estabelecidos e não muito confiáveis.

Conclusivamente, este método deve ser utilizado em condições onde não existem dados de radiação e que, como discutido por PELTON et al (1960) é um método que dificilmente será melhorado pois não tem nenhum fundamento físico, principalmente para regiões áridas (HASHEMI & HABIBIAN, 1982).

Os métodos baseados na umidade são os mais comuns. O primeiro é uma modificação da equação de Dalton onde o gradiente de pressão de vapor é trocado pelo déficit de saturação. A equação pode ser escrita da forma:

$$ETP = f(uz) (e_a - e_z)$$

onde $f(uz)$ é o fator vento que, frequentemente, é determinado empiricamente na forma

$$f(u) = a + b(uz)$$

Outro método é o proposto por Prescott que tem a forma:

$$ETP = C(e_a - e_z)^{0,75}$$

Estes métodos não apresentam vantagens sobre os baseados em temperatura, apresentando inclusive, a desvantagem de umi-

dade ser menos disponível que temperatura.

Os métodos empíricos que utilizam medições de evaporação de corpos d'água como por exemplo, tanque a atmômetros são os que tem sido grandemente utilizados no Brasil. Portanto, vamos discutir mais detalhadamente estes métodos.

Vários tipos de tanques tem sido utilizados, um aspecto importante é quanto a posição no solo, pois, esta irá determinar a troca e armazenamento de calor, coeficientes de transferência de calor e vapor. A troca de calor é um fator de grande importância, pois, é diferente do da planta. O armazenamento de calor é muito maior no tanque, quer na planta, de modo que a temperatura de água é maior que da planta durante o dia ocorrendo o inverso à noite, o que afeta a diferença entre pressão de vapor entre superfície e ar, a evaporação e a troca de calor sensível. Se o tanque é elevado acima da superfície do solo, a troca de radiação nos lados do tanque e troca de calor sensível passam a constituir a maior parte do calor total usado para a evaporação, o que não é o caso da planta.

Mesmo havendo estas limitações para o uso dos tanques de evaporação, tem-se encontrado elevadas correlações entre ETP e evaporação de tanques por períodos semanais e mensais.

Um problema em utilizar o tanque é quanto ao período de tempo em que deve estimar razoavelmente a ETP, que é relativamente longo.

Também nos atmômetros o balanço de energia é diferente do da vegetação. Porém, razoável correlação tem sido encontrada entre ETP e evaporação nos atmômetros. Para utilização destes equipamentos deve-se ter o cuidado de colocá-los numa altura standard e deve ser calibrado para o local.

Métodos diretos

Lisímetros são equipamentos que permitem determinar, diretamente, a evapotranspiração. Devem apresentar representatividade das condições de solo e cultura que se pretende estudar. Para projetar um lisímetro alguns aspectos tem que ser observados. Primeiramente, é necessário saber se serão determinados ETP e

ET_r ; segundo, conhecer a estrutura da vegetação e das raízes e, finalmente, o período de tempo em que ET será medido. Isto se deve ao fato de que no fundo do lisímetro encontra-se um plano em que a tensão de água é muito diferente da coluna de solo no campo, conseqüentemente, mais água está disponível ET e o crescimento de raízes será maior. Adicionalmente, é difícil construir lisímetros profundos. O que normalmente se faz é colocar sucção na base. Para manter as propriedades mecânicas do solo constrói-se lisímetros monolíticos. Lisímetros mais profundos tem como objetivo evitar a ocorrência de franja capilar.

O desenvolvimento radicular dentro do lisímetro pode não ser igual ao no campo, porém não deve influenciar no crescimento vegetativo.

A água do lisímetro é ditada pela estrutura da vegetação e construção das paredes do mesmo. O valor da evapotranspiração numa área igual a do lisímetro nas condições naturais. Repetição não resolve o problema da representatividade. Quanto mais desuniforme a vegetação maior a área do lisímetro. O mesmo ocorre com a desuniformidade do solo.

O ar entre as paredes e o material de construção do equipamento afetam as propriedades térmicas e hídricas que diferem das condições naturais. Paredes mais finas são preferenciais. O crescimento da vegetação no lisímetro reduz o erro referente à transferência e armazenamento de calor. Erros em medições diárias são menores que em horárias. Os lisímetros podem ser agrupados em dois tipos preferenciais: pesáveis e não pesáveis.

Nos não pesáveis, a diferença entre a quantidade de água aplicada e a drenada é medida para determinar ET. Este tipo de lisímetro é utilizado para determinar ET para longos períodos. Porém, se utilizarmos uma sonda de neutrons podemos fazer determinações semanalmente, com precisão relativamente boa.

Os lisímetros pesáveis são utilizados, com precisão, para determinações horárias, diárias, etc. Este tipo de lisímetro pode ser de balança, flutuáveis e de células hidráulicas. Os de pesagem mecânica fornecem dados mais realísticos que os outros, embora os flutuáveis sejam os mais econômicos.

Maiores detalhes sobre lisímetros são discutidos por ABOU KHALED (1982).

Para medição direta da ETr, os lisímetros são os melhores métodos. O maior inconvenientes do lisímetro são, primeiramente, o seu custo que é elevadíssimo e, em segundo lugar, o de manutenção, que é relativamente difícil e constante.

Um aspecto que deve ser salientado, é que todos os métodos utilizados para estimar a evapotranspiração, já discutidos, são utilizados para determinar ETP. Para estimar ETr será discutido apenas um método que determina ET/ETmax em função da condutância de vapor. A equação utilizada é:

$$ET/ET_{max} = \left\{ 1 + \left[\frac{\alpha}{(s + \alpha)} \right] (r_s/r_h) \right\}^{-1}$$

$$\text{onde } ET_{max} = ET_{Teg} + \left[\frac{(\rho c_p/\lambda)/(s + \alpha)}{h_H} (e_z^* - l_z) \right]$$

ETeg = ET quando a superfície está molhada e a camada da atmosfera sobre a superfície está saturada.

h_H = coeficiente de transferência

α = constante psicrométrica

λ = calor latente da vaporização

s = declividade da curva, saturação de vapor VS. temperatura

e_z^* = saturação de pressão de vapor

e_z = pressão de vapor

r_s = resistência à difusão de calor

r_H = resistência a transferência de calor

A objeção a este método baseia-se principalmente na dissimilaridade de distribuição de fonte de vapor e calor no dossel e solo. O r_s é uma mistura de solo e dossel.

Outro método é através do balanço hídrico que será discutido posteriormente.