

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária

PHD – 307 Hidrologia Aplicada



Prof. Dr. Rubem La Laina Porto

Prof. Dr. Kamel Zahed Filho

Ricardo Martins da Silva

Sandra Soares Sá Dourado

São Paulo, 2000

Resumo

Esta apostila tem como objetivo auxiliar o aluno no entendimento do processo de evapotranspiração. São apresentados os princípios físicos da evaporação e da transpiração, as variáveis importantes nos processos. São apresentados os métodos de medição direta e as fórmulas para obtenção indireta.

Objetivo

Você deverá, após o estudo deste texto, ser capaz de:

- Conhecer os processos físicos da evaporação e da transpiração;
- Saber identificar as variáveis importantes nesses processos;
- Conhecer como se mede a evaporação e a transpiração;
- Saber diferenciar evaporação real de potencial;
- Saber diferenciar evapotranspiração real de potencial;
- Conhecer os métodos de cálculo;
- Saber aplicar o método de Blaney-Criddle

Referências Bibliográficas

Você encontrará em mais detalhes o assunto tratado nesta apostila nas seguintes referências:

- Bras, R. L. – Hydrology – Na Introduction do Hydrologic Science,- Addison- Wesley Publishing Company – 1990.
- Chow, V.T.- Handbook of Applied Hydrology –Mc-Graw-Hill Book Company- 1964.
- Chow, V.T.; Maidment, D.R.;Mays, L.W. - Applied Hydrology. New York, McGrawHill, 572p. 1988.
- Linsley, R. K. – Engenharia de Recursos Hídricos – McGraw-Hill do Brasil/ Ed. da USP, 1978.
- Maidment, D.R. – Handbook of Hydrology. New York, McGrawHill, 1993
- Tucci, C.E. M. - Hidrologia – Ciência e Aplicação – Ed.da Univ. Federal do Rio Grande do Sul, EDUSP e ABRH- 1997.

Índice

1. Introdução	1
2. Evaporação	4
3. Determinação da Evaporação Potencial	4
3.1. Determinação Direta da Evaporação Potencial	5
3.1.1. Evaporímetros	5
3.1.2. Atmômetros	7
3.1.3. Evaporógrafo de Balança	8
3.2. Determinação Indireta da Evaporação Potencial	8
3.2.1. Método de Penman	8
3.2.2. Método do Balanço Hídrico	9
3.2.3. Método das Fórmulas Empíricas	10
4. Transpiração	11
5. Evapotranspiração	11
5.1. Determinação Direta da Evapotranspiração Potencial	12
5.1.1. Lisímetros	12
5.2. Determinação Indireta da Evapotranspiração Potencial	15
5.2.1. Método de Thornthwaite	15
5.2.2. Método do Tanque Classe A	16
5.2.3. Método de Blaney - Criddle	17
5.2.4. Método de Penman	18
5.3. Determinação Indireta da Evapotranspiração Real	18
5.3.1. Método do Balanço Hídrico	18
5.3.2. Método dos Coeficientes de Cultura	19

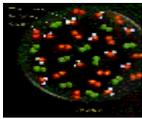
Sugestão para facilitação da leitura

Esta apostila constitui-se de um texto principal que possui um apêndice anexado. O texto principal possui as informações objetivo da apostila e no apêndice encontra-se informações adicionais para o entendimento do texto.

Os números que aparecem sobrescritos nas palavras sublinhadas indicam o número do item no apêndice a que o [link](#) está associado, visando facilitar sua localização no caso da leitura deste material na forma impressa.

Para uma versão *on line*, utilize o botão  *Voltar* da **Barra de navegação da Web** para voltar após a visita a um [link](#). A **Barra de navegação da Web** é ativada automaticamente após o primeiro link ser visitado. Caso isto não ocorra, proceda da seguinte forma:

- Clique com o botão direito do mouse na região das barras de ferramentas (onde ficam os botões na tela do Word)
- Selecione a opção **Web**



1. Introdução

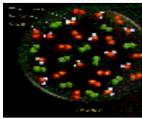
“A **Evaporação** refere-se à mudança da água do seu estado líquido para o estado vapor, por ação da energia solar. A Evaporação pode ocorrer em corpos d'água, solos saturados ou de superfícies não saturadas.

A **Evaporação Potencial** é a taxa de evaporação de uma dada superfície, controlada climaticamente, quando a quantidade disponível e a taxa de alimentação de água à superfície são ilimitadas.

A **Transpiração** é a evaporação que ocorre das folhas das plantas, através das aberturas dos estômatos. Novamente, dada uma taxa ilimitada de alimentação de água na zona das raízes, a **Transpiração Potencial** é uma função do clima e da fisiologia da planta. A transpiração real, sob condições limitadas de água depende da habilidade da planta em extrair a umidade do solo parcialmente saturado com capacidade limitada de transferir água.

Em ciência e engenharia utiliza-se freqüentemente o termo **Evapotranspiração**. Ele é a soma total da evaporação e da transpiração. O termo procura responder à dificuldade em separar os dois fenômenos, na situação usual onde a cobertura vegetal não é completa.

Antes de entrar nos detalhes do processo de evapotranspiração, deve-se enfatizar sua importância no ciclo hidrológico. De toda a precipitação que ocorre sobre os continentes, 57% evapora, enquanto que nos oceanos a evaporação corresponde a 112% do total precipitado. Em uma região semi-árida, cerca de 96% da precipitação total anual pode evaporar. A evapotranspiração diária pode variar em uma faixa de 0 a 12 mm por dia. Durante uma chuva intensa, a evaporação é reduzida a um mínimo, por causa das condições de saturação do ar; entretanto, a evapotranspiração entre as tormentas é normalmente suficiente para deplecionar completamente a umidade do solo em regiões áridas e tem influência significativa na umidade do solo e nas respostas hidrológicas futuras em todos os lugares.



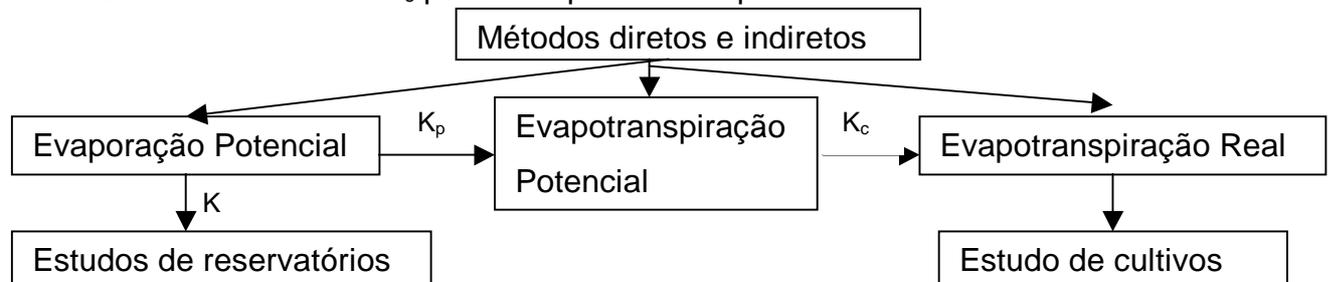
As estimativas de evaporação são críticas em projetos de reservatórios e planejamento agrícola. Por exemplo, a evaporação do lago Nasser, formado pela barragem de Assuã, no Egito, é da ordem de 15% da vazão anual média do Rio Nilo. As perdas de água dessa magnitude influenciam o projeto, a operação e o gerenciamento de recursos hídricos que afetam muitos países”. (Bras, R. L., 1990).

Assim, a **Evaporação Potencial** é correspondente à máxima evaporação possível de uma determinada área. Seu estudo é importante, por exemplo, quando se quer analisar a perda de água de um reservatório por evaporação.

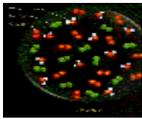
A **Evapotranspiração** é a perda de água que ocorre numa determinada bacia, considerando-se a evaporação e a transpiração dos vegetais. A **Evapotranspiração Potencial** é um valor de referência, pois caracteriza a perda de água da bacia como se toda a vegetação fosse um *gramado* de uma espécie vegetal padronizada. Portanto, é um índice que independe das características particulares de transpiração da cultura plantada na região estudada, levando em conta apenas o clima, o tipo de solo, e as superfícies livres de água na bacia.

Uma das maneiras de se determinar a **Evapotranspiração Potencial** é a partir da **Evaporação Potencial**, utilizando um coeficiente k_p que particulariza o tipo de solo, ventos, entre outros. Como se verá adiante, esta última é mais fácil de ser determinada, utilizando-se por exemplo, tanques apenas com água.

A **Evapotranspiração Real** constitui a perda de água que realmente ocorre na bacia, considerando a vegetação existente. Pode-se determinar a Evapotranspiração Real indiretamente a partir da Evapotranspiração Potencial através de um coeficiente k_c particular para cada tipo de cultura.



Em condições normais de cultivo de plantas de ciclos anuais, logo após o



plântio a ET real é bem menor do que a ET potencial. Esta diferença vai diminuindo à medida que a cultura se desenvolve (em razão do aumento foliar), tendendo para uma diferença mínima antes da maturação. Tal diferença volta a aumentar quando a planta atinge a maturidade (colheita). (Figura 1.1).

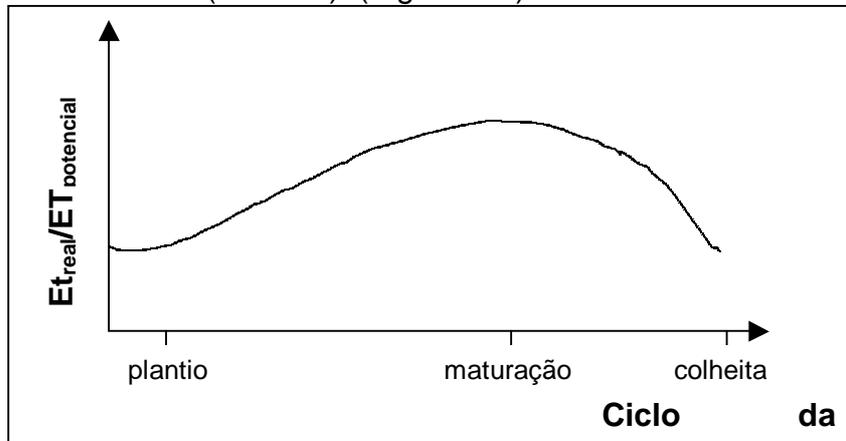
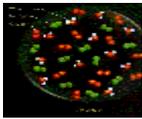


Figura 1.1 - Relação entre E.T. Real e E.T. Potencial para cultura de ciclo curto



2. Evaporação

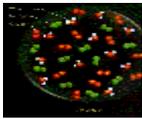
A evaporação é um fenômeno de natureza física no qual as moléculas de água passam do estado líquido para o estado gasoso. Ocorre nas superfícies líquidas de reservatórios, lagos e rios, na superfície dos solos úmidos, etc.

O [processo físico](#)¹ da evaporação é função principalmente da [temperatura](#)² e [umidade](#)³, sendo influenciado ainda pela [pressão atmosférica](#)⁴, velocidade média do [vento](#)⁵ na região, [sólidos solúveis](#)⁶, [umidade e natureza do solo](#)⁷. Regiões de clima seco e quente favorecem a evaporação ao passo que em regiões de clima frio e úmido ocorre o contrário.

3. Determinação da Evaporação Potencial

Tabela 3.1 – Métodos de obtenção da Evaporação

	Obtenção	
	Direta	Indireta
Evaporação Potencial	<ul style="list-style-type: none">○ Evaporímetros<ul style="list-style-type: none">● Tanque classe A-USWB● Tanque GGI - 3000● Tanque de 20 m²● Tanque Flutuante● Outros tanques○ Atmômetros<ul style="list-style-type: none">● Livingston● Bellani● Piché○ Evapógrafo de Balança	<ul style="list-style-type: none">○ Método de Penman○ Método da Transferência de Massa○ Método da Energia○ Método do Balanço Hídrico○ Método das Fórmulas Empíricas



3.1. Determinação Direta da Evaporação Potencial

3.1.1 Evaporímetros

Por muitos anos, medidas tomadas em tanques de evaporação têm sido utilizadas para estimativas em *reservatórios*. A popularidade dos tanques prende-se ao fato de serem baratos, de simples operação e porque o coeficiente de conversão lago x tanque permanece razoavelmente constante de ano para ano, e para dada região. Entre os vários tipos de tanque, os mais utilizados são os seguintes:

- a) **Tanque classe A – USWB :** De grande utilização no Canadá e nos EUA, o tanque classe A (Figura 3.1) é cilíndrico com 1.20 m de diâmetro, 25 cm de profundidade, sendo instalado sobre estrados de madeira à 15 cm da superfície do solo, sendo construído de chapa galvanizada número 14, sendo o nível de água mantido durante a operação entre 50 e 75 mm, a partir do bordo superior. As medidas de altura da lâmina evaporada são realizadas com uma ponta de medida acoplada a um poço tranqüilizador. Quando no período ocorrer chuva, correções devem ser feitas pelo pluviômetro (isto pode ser, no caso de chuva intensa, fonte de grande erro). Medidas simultâneas de vento a 2 m e de temperatura da água devem ser realizadas, embora esta seja sempre próxima da temperatura do ar.

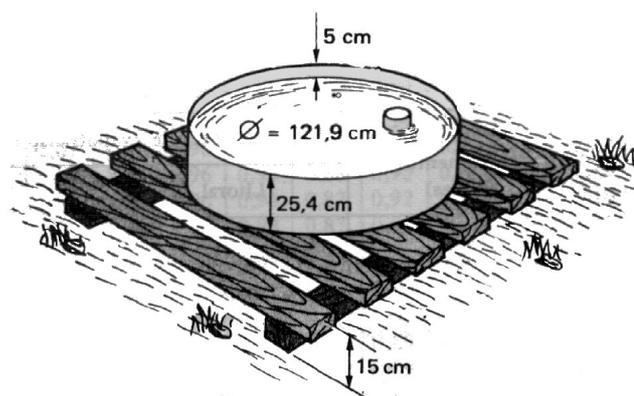
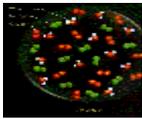


Fig. 5.5 – Tanque “Classe A” – US Weather Bureau

Figura 3.1 - Tanque classe A – US Weather Bureau



- b) **Tanque GGI – 3000:** Trata-se de um tanque cilíndrico, com diâmetro interno 61.8 cm e altura 60 cm, sendo enterrado no solo, com borda 7.5 cm acima da superfície. A medida da alteração de nível de água (altura de lâmina evaporada) é feita com um copo volumétrico.
- c) **Tanque de 20 m²:** Trata-se de um tanque cilíndrico de fundo plano construído em chapa de ferro de 1/4 de polegada de espessura, parede lateral de chapa 3/16 polegadas, diâmetro 5.0 m e altura 2.0 m. O tanque é enterrado e as medidas de evaporação são feitas com copo volumétrico.
- d) **Tanque flutuante:** Este tanque é quadrado, com 3 pés de lado e 18 polegadas de profundidade, suportado por tambores flutuantes no centro de uma balsa de 14 por 16 pés. O nível da água no tanque é o mesmo da água ao seu redor. Embora desta maneira se possa obter excelentes resultados, o modelo é pouco utilizado por causa das dificuldades de manuseio e da ação de ondas e respingos.

Aplicações:

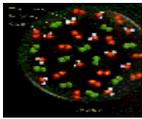
É grande a utilização dos tanques de evaporação na prática, destacando-se entre eles o tanque Classe-A e o GGI-3000. A evaporação de espelhos de água (lagos) é obtida multiplicando-se a lâmina medida no tanque, por um coeficiente de ajuste, denominado coeficiente de tanque, ou seja:

$$E = k \cdot Et$$

onde:

- E : evaporação do lago (espelho de água);
- k : coeficiente do tanque;
- Et : evaporação do tanque

Este coeficiente de ajuste se faz necessário porque o tanque não simula exatamente um reservatório de grandes dimensões, sofrendo por exemplo, insolação nas paredes laterais.

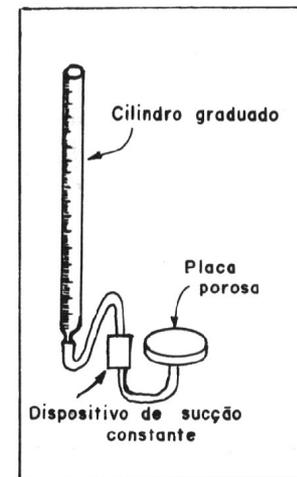


3.1.2 **Atmômetros**

De acordo com Livingston, atmômetro é qualquer instrumento de qualquer forma usado para medição ou estimativa de diferentes intensidades de evaporação. Os principais tipos de atmômetros são descritos a seguir:

a) **Atmômetro de Livingston:** É essencialmente constituído por uma esfera oca de porcelana porosa de cerca de 5 cm de diâmetro e 1 cm de espessura. A esfera é cheia de água destilada e se comunica com uma garrafa contendo água destilada que assegura o permanente enchimento da esfera e permite a medida do volume evaporado.

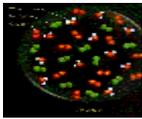
b) **Atmômetro de Bellani:** É semelhante ao atmômetro de Livingston, com exceção de que a esfera é substituída por um prato liso.(Figura 3.2).



a) Atmômetro

Figura 3.2 - Atmômetro de Bellani

c) **Atmômetro de Piché:** É constituído por um tubo cilíndrico de vidro de 25 cm de comprimento e 1.5 cm de diâmetro. O tubo é graduado e fechado em sua parte superior; a abertura inferior é obturada por uma folha circular de papel-filtro padronizado, de 30 mm de diâmetro e de 0.5 mm de espessura, fixado por capilaridade e mantido por uma mola. O aparelho é previamente cheio de água destilada, a qual se evapora progressivamente pela folha de papel-filtro. A diminuição do nível de água no tubo permite calcular a taxa de evaporação.



Os atmômetros não se constituem num bom método de avaliação da evaporação. O atmômetro de Livingston apresenta diferentes valores de evaporação de acordo com a cor da esfera de porcelana (pode ser branca ou preta), que afeta a absorção da radiação solar. No caso do atmômetro de Piché, ele é instalado debaixo de um abrigo para proteger o papel filtro da ação da chuva e em conseqüência disto o aparelho não leva em conta a influência da insolação.

3.1.3 Evaporógrafo de Balança

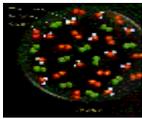
Trata-se de um aparelho composto por uma balança de precisão com prato próprio para colocação de água, e uma agulha sensível que registra as modificações na massa do prato. Inicialmente, o prato é cheio com uma determinada massa de água. À medida que essa água evapora, a agulha registra a variação de sua massa, construindo um gráfico de evaporação (em mm) por tempo.

Como se trata de um aparelho sensível, deve ser instalado sob um abrigo. Desta forma simulam-se as condições de evaporação de um solo à sombra de uma cultura (café, por exemplo). Por esse motivo o Evaporógrafo de Balança é bastante utilizado na agricultura.

3.2. Determinação Indireta da Evaporação Potencial

3.2.1. Método de Penman

Por métodos combinados entendem-se todos aqueles que combinam as bases físicas do balanço de energia radiante com processos de transferência de massa. Dentre eles, destaca-se o método de Penman (1948). Este método é importante, devido não só aos excelentes resultados obtidos com sua aplicação, mas também pela viabilidade de utilização (a evaporação é definida em função de parâmetros climáticos, obtidos normalmente em estações meteorológicas padrão). A equação básica de Penman, derivada para pequenos corpos de água, é :



$$E = \frac{D_e \cdot R_l + G_a \cdot E_a}{D_e + G_a}$$

onde:

- R_l : balanço de energia radiante sobre o sistema (radiação líquida) em mm de evaporação equivalente/dia;
- D_e : tangente à curva tensão de saturação do vapor de água no ponto temperatura média do ar;
- G_a : constante psicrométrica (aproximadamente 0.5 mm hg/°C);
- E_a : poder evaporante do ar à sombra (mm/dia):

$$E_A = 0.35 \cdot \left[0.5 + \left(\frac{U}{160} \right) \right] \cdot (e_0 - e_A)$$

- U : velocidade do vento a 2.0 m acima da superfície evaporante em km/dia;
- $(e_0 - e_A)$: déficit de saturação do ar (mm hg).

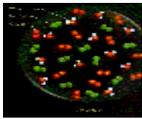
3.2.2. Método do Balanço Hídrico

Este método é utilizado no estudo de água perdida por evaporação em reservatórios. Baseia-se no princípio de conservação de massa do sistema (reservatório) e apresenta, entretanto, [algumas desvantagens](#)¹².

$$EP = I + P - O - D + DS$$

onde:

- EP: evaporação potencial;
- I: entrada de água no sistema;
- P: precipitação pluviométrica;
- O: saída de água do sistema;
- DS: variação de armazenamento de água;
- D: drenagem profunda.



3.2.3. Método das Fórmulas Empíricas

Os métodos do balanço hídrico e balanço de energia, embora teoricamente exatos, requerem dados os quais para a maioria das localidades não são prontamente disponíveis, sendo dispendiosa a instrumentação de um reservatório para a aquisição de tais dados. Em tais circunstâncias, é freqüente o uso de fórmulas empíricas. A maioria destas fórmulas está baseada numa equação aerodinâmica do tipo:

$$E = k \cdot f(u) \cdot (e_0 - e_A)$$

onde:

- E : taxa de evaporação;
- k : constante;
- f(u) : uma função da velocidade do vento;
- e₀ : pressão de saturação à temperatura da superfície evaporante;
- e_A : pressão parcial de vapor por sobre a superfície evaporante a uma determinada altura;

Algumas das expressões mais comuns destas fórmulas empíricas são as seguintes:

a.) Meyer (1915) EUA (lagos pouco profundos):

$$E = 11 \cdot (1 + 0.1 \cdot U_u) \cdot (e_0 - e_A)$$

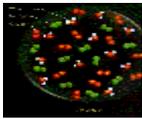
- E (pol/mês);

b.) Rohwer (1931):

$$E = [0.711 \cdot (1.465 - 0.0186 \cdot P)] \cdot [(0.44 + 0.118 \cdot U_0) \cdot (e_0 - e_A)]$$

- E (pol/dia);
- P : pressão barométrica (pol de Hg);

c.) Penman (1948) Inglaterra (pequenos tanques, visto no *item* 3.2.1)



Nas equações anteriores, a velocidade do vento é expressa em milhas por hora, e a pressão de vapor, em polegadas de mercúrio. O subscrito nas letras indica a altura na qual foi feita a medida (provavelmente em metros). É freqüente a substituição da pressão de vapor pelo valor da pressão de saturação à temperatura média do ar no período da observação.

Aplicações:

A grande utilização dos métodos empíricos provavelmente se deve à sua simplicidade e devido à possibilidade das estimativas serem realizadas com dados meteorológicos normalmente disponíveis. É necessário que os usuários destas equações saibam de suas limitações. As equações requerem o conhecimento da temperatura da superfície da água, medida que não é usualmente realizada. Se utilizarmos em substituição, a temperatura média do ar, podemos introduzir grandes erros de estimativa. Usualmente também é difícil ajustar os dados obtidos às diferentes alturas preconizadas, porque nos falta o conhecimento de bons modelos de estimativa de variação de temperatura e umidade com altura.

4. Transpiração

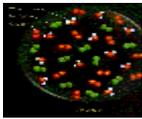
A transpiração é um fenômeno de natureza [fisiológica vegetal](#)⁸, que consiste na eliminação de água pela vegetação.

[Detalhes de determinação](#)⁹ >>>

5. Evapotranspiração

A evapotranspiração varia com a própria atividade vital da vegetação, que é variável durante o ano em função da insolação, temperatura e condições climáticas, de maneira geral.

A evapotranspiração engloba tanto a evaporação como a transpiração mencionadas, além de incluir a evaporação da água interceptada pela vegetação.



A **evapotranspiração potencial** é a máxima evapotranspiração que ocorreria se o solo dispusesse de suprimento de água suficiente e a planta em questão tivesse no auge da quantidade de folhas. Nos períodos de deficiência de chuva em que os solos tornam-se mais secos, a [evapotranspiração real¹⁰](#) ou efetiva é sempre menor do que a potencial. Este distanciamento também se verifica quando as plantas estão germinando e na época da colheita. No período de maturação da lavoura se dá a maior proximidade entre os valores real e potencial.

O estudo da evapotranspiração potencial é, portanto, de importância fundamental na avaliação das necessidades de água para a agricultura em projetos de irrigação.

O quadro a seguir resume os principais meios utilizados nas determinações da evapotranspiração real e potencial.

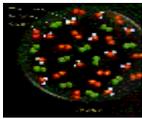
Quadro 5.1 - Métodos de obtenção da evapotranspiração

	Obtenção	
	Direta	Indireta
Evapotranspiração Potencial	<ul style="list-style-type: none">○ Lisímetros<ul style="list-style-type: none">• Tipos percolação• Tipos de pesagem	<ul style="list-style-type: none">○ Equação de Thornthwaite○ Método de Blaney-Criddle○ Método de Penman
Evapotranspiração Real	----	<ul style="list-style-type: none">○ Método do Balanço Hídrico○ Método dos Coeficientes de Cultura

5.1. Determinação Direta da Evapotranspiração Potencial

5.1.1. Lisímetros

São tanques enterrados no solo, por meio dos quais mede-se a evapotranspiração **potencial**. Uma grama padrão é plantada sobre o tanque e ao redor do mesmo como indica a Figura 5.1. A evapotranspiração potencial obtida é



uma simples referência, pois a cultura utilizada é uma grama padrão. É importante salientar que o tanque deve ser preenchido com o solo natural da bacia estudada e o mesmo deve ser enterrado nesta mesma bacia a fim de se manter as condições climáticas.

A superfície da amostra de solo é submetida aos agentes atmosféricos (medidos em posto meteorológico vizinho) e recebe as precipitações naturais que são medidas por um pluviômetro. O solo contido no lisímetro é drenado no fundo da cuba, medindo-se a água assim recolhida. A evapotranspiração potencial (ETP) durante um período determinado pode ser calculada, conhecendo-se as precipitações (P) desse período, a drenagem correspondente (Q) e a variação (DR) da quantidade de água acumulada no lisímetro, através da Equação do Balanço Hídrico:

$$ETP = P - Q + DR$$

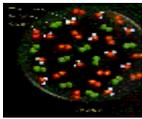
onde:

- ETP : evapotranspiração potencial;
- P : precipitações;
- Q : drenagem;
- DR : variação da quantidade de água acumulada no lisímetro.

A variação (DR) da retenção pode ser avaliada pelas medidas da umidade do solo a diferentes profundidades. Entretanto, como essas medidas não são muito precisas na maioria das vezes, determina-se a evaporação em períodos suficientemente longos para que DR seja desprezível face à evaporação. Em geral as medidas se referem a períodos de, no mínimo, duas semanas e, mais freqüentemente de um mês.

A evapotranspiração **real** pode ser obtida indiretamente a partir desse valor potencial de referência multiplicando-o por um coeficiente que particulariza a plantação (arroz, batata, etc.). Esta conversão será vista no [item 5.3.2](#), que trata de evapotranspirações reais.

Sendo um método que reproduz bem a situação real, é o procedimento mais preciso para a determinação de evapotranspiração real ([item 5.3.2](#)).



Os cuidados básicos na instalação de um lisímetro são os seguintes:

- Deve ser largo para reduzir o efeito de sua parede interna e ter tamanho significativo (área mínima 2 m², volume mínimo 2 m³);
- Deve ser suficientemente profundo para não restringir o desenvolvimento do sistema radicular;
- Ter solo e cultura nas mesmas condições do solo externo.

A construção de um bom lisímetro requer alto investimento, sendo portanto, utilizado quase sempre como método de aferição para outros métodos mais práticos (viáveis).

a) **Lisímetro de percolação** : Consiste em um tanque enterrado com as dimensões mínimas de 1,5 m de diâmetro por 1,0 m de altura, no solo, com a sua borda superior 5 cm acima da superfície do solo. Do fundo do tanque sai um cano que conduzirá a água drenada até um recipiente. O tanque tem que ser cheio com o solo do local onde será instalado o lisímetro, mantendo a mesma ordem dos horizontes. No fundo do tanque, coloca-se uma camada de mais ou menos 10 cm de brita coberta com uma camada de areia grossa. Esta camada de brita tem a finalidade de facilitar a drenagem d'água que percolou através do tanque. Depois de instalado, planta-se grama no tanque e na sua área externa. A Figura 5.1 ilustra este tipo de lisímetro.

O tanque pode ser um tambor, pintado interna e externamente para evitar corrosão, tanque de amianto ou tanque de metal pré-fabricado.

A evapotranspiração potencial em um período qualquer é dada pela equação:

$$ETP = \frac{I + P - D}{S}$$

onde:

- ETP : Evapotranspiração potencial, em mm;
- I : Irrigação do tanque, em litros;
- P : Precipitação pluviométrica no tanque, em litros;
- D : Água drenada do tanque, em litros;
- S : Área do tanque, em m².

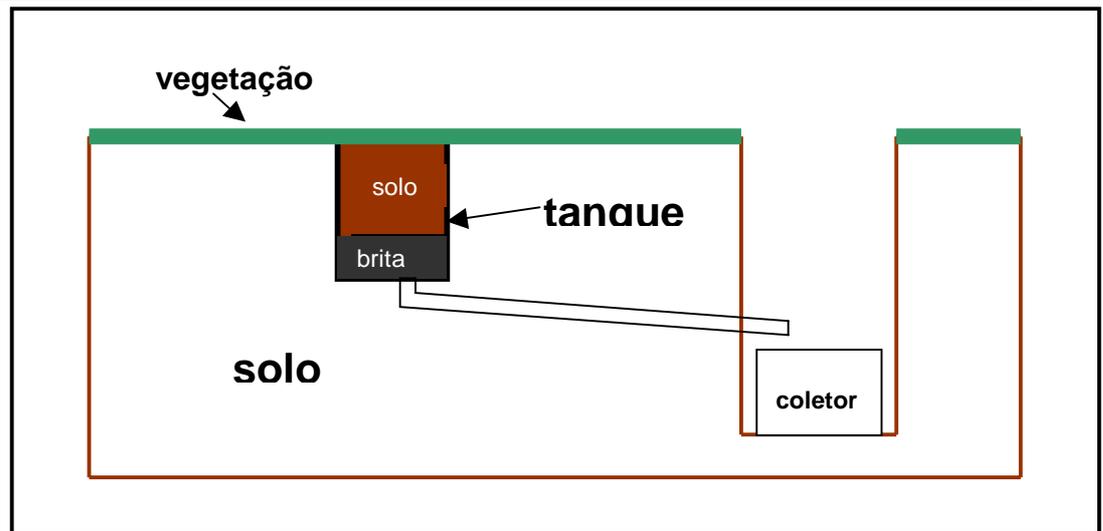
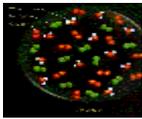


Figura 5.1 - Esquema de um lisímetro

Sendo o movimento d'água no solo um processo relativamente lento, os lisímetros de percolação somente têm precisão para períodos mais ou menos longos. A evapotranspiração potencial por eles determinada refere-se a valores médios semanais, quinzenais ou mensais. Necessitam ser irrigados a cada quatro ou cinco dias, e com uma quantidade d'água tal, que a água percolada seja em torno de 10% do total aplicado nas irrigações.

b) **Lisímetro de pesagem mecânica:** Permite a determinação da ET em períodos curtos (horária ou diária), o que não acontece com os lisímetros não pesáveis. É imprescindível em centros de pesquisas, de modo que possamos calcular os coeficientes de correção para os outros métodos indiretos ou empíricos ([item 5.3.2](#)).

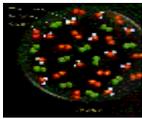
5.2. Determinação Indireta da Evapotranspiração Potencial

5.2.1. Método de Thornthwaite

Thornthwaite (1948), a partir da correlação entre dados de evapotranspiração medida e temperatura do ar, elaborou o seguinte método empírico:

$$ETP = b \cdot (T_m)^a$$

onde:



- $a = (67.5 \cdot 10^{-8} \cdot I^3) - (7.71 \cdot 10^{-6} \cdot I^2) + (0.01791 \cdot I) + 0.492$;
- $I = \sum_1^{12} \left(\frac{Tm_i}{5} \right)^{1.514}$ (soma dos doze meses do ano);
- $b = (N/12)$ (fator de ajuste do comprimento do dia);
- ETp : evapotranspiração potencial (mm/mês);
- N : máxima insolação diária, função da latitude e do mês;
- I : índice de calor;
- T_m : Temperatura média diária.

O método de Thornthwaite, sendo uma fórmula empírica perde alguma precisão (quando aplicado na escala diária, por exemplo), mas ainda é um dos métodos mais utilizados pelos seguintes motivos:

- Utiliza apenas a temperatura do ar para aplicação;
- Mesmo para regiões sem nenhuma informação climática, as temperaturas médias mensais e anuais podem ser estimadas através de equações de regressão temperatura x altitude, latitude, longitude;
- Quando aplicado para períodos superiores a dez dias, suas estimativas são razoáveis.

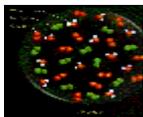
5.2.2. Método do Tanque Classe A

Com o valor da evaporação potencial (EP) pode-se estimar a evapotranspiração potencial (ETP).

Recomenda-se então, de acordo com o trabalho de Doorembos e Pruitt (1975), que se multiplique o valor da altura de evaporação obtida no tanque Classe A por um fator de proporcionalidade, denominado coeficiente de tanque (K_p) que depende do valor da velocidade do vento e umidade relativa observadas no período, assim como das condições de exposição do tanque. A equação proposta é a seguinte:

$$ETP = k_p \cdot EP$$

onde:



- EP : evaporação medida no tanque evaporimétrico em mm/dia;
- ETP : evapotranspiração potencial em mm/dia, representa a média diária para o período considerado:
- k_p : coeficiente de correlação, que depende do tipo de tanque e de outros parâmetros meteorológicos.

Como o tanque evaporimétrico Classe A é largamente utilizado no Brasil, na Tabela 5.3 abaixo estão indicados valores do coeficiente k_p , para o tanque Classe A para o Estado de São Paulo.

Tabela 5.3 – Coeficiente k_p para o tanque classe A no Estado de São Paulo

MÊS	FATOR (k_p)	MÊS	FATOR (k_p)
Janeiro	0,74	Julho	0,72
Fevereiro	0,80	Agosto	0,69
Março	0,69	Setembro	0,66
Abril	0,75	Outubro	0,80
Maio	0,63	Novembro	0,79
Junho	0,75	Dezembro	0,87

5.2.3. Método de Blaney - Criddle

Este método foi desenvolvido em 1950, na região Oeste dos EUA, sendo por isso mais indicado para zonas áridas e semi-áridas, e consiste na aplicação da seguinte fórmula para avaliar a evapotranspiração potencial:

$$ETP = p \cdot (0,46 \cdot t + 8,13)$$

onde:

- ETP : evapotranspiração potencial, em mm/mês;
- p : porcentagem mensal de horas-luz do dia durante o ano (" p " é o valor médio mensal);
- t : temperatura média mensal do ar, em °C.

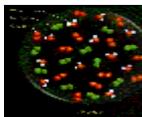


Tabela 5.4 - Valores de p

VALORES DE (p) SEGUNDO BLANEY - CRIDLE												
LAT. SUL	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
20 ^o E	9,26	8,02	8,58	7,89	7,88	7,43	7,71	8,02	8,12	8,79	8,91	9,33
22 ^o E	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 ^o E	9,44	8,17	8,60	7,83	7,64	7,24	7,54	7,90	8,10	8,87	9,04	9,53

5.2.4. Método de Penman

A equação proposta por Penman para o cálculo da evapotranspiração potencial é similar à utilizada para estimar a evaporação, determinando-se neste caso evapotranspiração ao invés de evaporação.

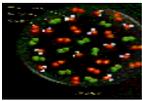
5.3. Determinação Indireta da Evapotranspiração Real

5.3.1. Método do Balanço Hídrico

Este método envolve a aplicação do balanço de água e é utilizado para bacias hidrográficas. A quantidade de água recebida pela área, geralmente na forma de precipitação (P), menos a saída de água pela rede de drenagem (S), mais ou menos a variação de armazenamento (DA) no período, deve ser igual a evapotranspiração real (ETR), ou seja:

$$ETR = P - S \pm DA$$

Sua aplicação restringe-se à bacias hidrográficas e requer montagem de diversos equipamentos (limnógrafos, vertedores, pluviômetros, etc.). Sua aplicação é por isso restrita a grandes projetos.



5.3.2. Método dos Coeficientes de Cultura

O método dos coeficientes de cultura é utilizado para estimativa da demanda real de água de uma cultura em cada fase de crescimento, sendo método base para projetos de irrigação. Consiste em si, na determinação da evapotranspiração real, através da multiplicação do valor de evapotranspiração potencial do período pelo valor do coeficiente de cultura (K_c) da fase, ou seja:

$$ETR = K_c \cdot ETP$$

onde:

- ETR: evapotranspiração real da fase (mm/período);
- K_c : coeficiente de cultura de fase (adimensional);
- ETP: evapotranspiração potencial do período (mm/período);

A evapotranspiração potencial pode ter sido calculada com um lisímetro, como foi mostrado no [item 5.1.1](#). O coeficiente que relaciona os resultados do lisímetro (evapotranspiração potencial no campo – grama padrão) com a evapotranspiração real de uma dada cultura (soja, por exemplo) é determinado num laboratório. Esse coeficiente depende apenas das características de transpiração da cultura, ou seja, não varia de região para região e nem ao longo do tempo. O laboratório compara os resultados de um lisímetro com grama padrão com os resultados de cada um dos outros lisímetros plantados com diferentes culturas (todos são mantidos nas mesmas condições climáticas).

A Figura 5.2 mostra lisímetros de laboratório onde se planta diretamente a cultura (evapotranspiração real) para posterior relacionamento com os resultados obtidos com a grama padrão.

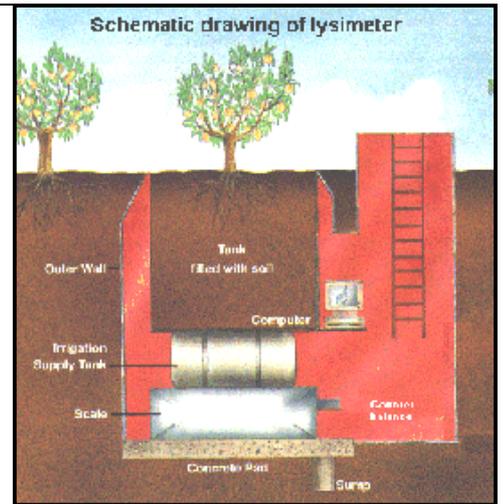
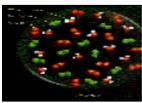
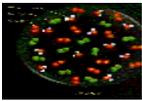


Figura 5.2 – lisímetros onde se estuda diretamente a cultura (evapotranspiração real). À esquerda, uma vista da superfície. À direita, uma representação esquemática.

Feita a comparação, os coeficientes de relacionamento para as diversas culturas com a grama padrão é publicado e pode ser utilizado em qualquer região, uma vez que o que é afetado pelas variações climáticas é a evapotranspiração potencial.

Tabela 5.5 – Coeficiente de cultura k_c

EVAPOTRANSPIRAÇÃO (Ciclo)	ETP (mm)	Kc (%)
Abacate	650 - 1000	65 - 75
Banana	700 - 1700	90 - 105
Feijão	250 - 400	20 - 25
Cacau	800 - 1200	95 - 110
Café	800 - 1200	95 - 110
Algodão	550 - 950	95 - 110
Milho	400 - 700	30 - 45
Frutíferas de clima temperado	700 - 1050	60 - 70
Grãos	300 - 450	25 - 30
Alho	350 - 600	25 - 40
Laranja	600 - 950	60 - 75
Batata	350 - 625	25 - 40



Arroz	500 - 800	45 - 65
Sorgo	300 - 650	30 - 45
Soja	450 - 825	30 - 45
Beterraba	450 - 850	50 - 65
Cana-de-Açúcar	1000 - 1500	105 - 120
Batata Doce	400 - 675	30 - 45
Fumo	300 - 500	30 - 35
Tomates	300 - 600	30 - 45
Vegetais	250 - 500	15 - 30
Videiras	450 - 900	30 - 55

O coeficiente k_c depende do estágio de desenvolvimento e do tipo de cultura, além de ser específico para cada método utilizado (lisímetro, Penman, tanques, ...) para determinação da evapotranspiração potencial.

Exemplo:

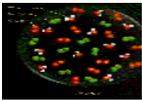
Seja calcular o valor da demanda máxima diária para cultura de milho na fase III (enchimento do grão) em local de umidade relativa mínima 18% e velocidade média do vento de 6 m/s, sendo $ETP = 5$ mm/dia.

$$KC = 1.2 \text{ (tabela)}$$

$$ETR = 1.2 * 5.0 = 6.0$$

$$ETR = 6.0 \text{ mm/dia}$$

A avaliação da evapotranspiração real (ETR) a partir da evapotranspiração potencial (ETP) calculada pelos métodos vistos anteriormente é de grande valia para a irrigação, pois proporciona meios práticos para o controle das aplicações de água, bem como condições para o planejamento da agricultura irrigada.

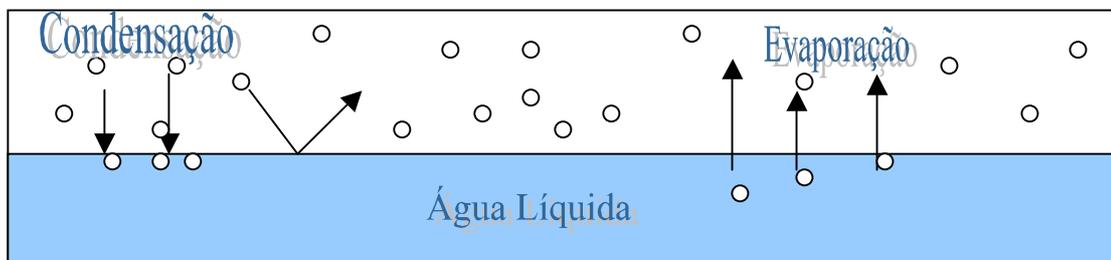


Apêndice

1. Processo físico

Na evaporação a água passa do estado líquido para o de vapor. Isso ocorre quando algumas moléculas da superfície obtêm energia suficiente para escapar da massa de água líquida. São as moléculas superficiais que passam para o estado de vapor absorvendo energia do meio (radiação solar, etc.) e por esse motivo não há necessidade da temperatura de ebulição ser atingida.

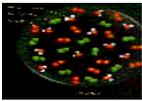
O movimento das moléculas de água através da superfície produz uma pressão denominada pressão de vapor. As moléculas que escapam colidem com as outras no ar e algumas das primeiras irão se liquefazer novamente. Quando o número de moléculas que escapam é igual ao número que cai de volta, o equilíbrio é alcançado entre a pressão exercida pelo escape das moléculas e a pressão atmosférica em torno da massa líquida. Esta condição de equilíbrio é conhecida como saturação. A evaporação é mais rápida que a condensação se o espaço sobre a água não estiver saturado.



A taxa de evaporação será determinada pela diferença entre a pressão de vapor do corpo de água e a pressão do ar acima da superfície de água. Sob dadas condições, a evaporação é proporcional ao déficit de pressão de vapor, que é a diferença entre a pressão de saturação do vapor à temperatura da água e a pressão de vapor do ar. Isso é mostrado pela lei de Dalton:

$$E = C \cdot (e_w - e_A)$$

onde:



E : taxa de evaporação

C : coeficiente de ajuste

e_w : pressão de saturação de vapor de água no ar atmosférico

e_A : pressão atual de vapor de água no ar atmosférico

Tratando-se agora da evaporação da superfície do solo, o processo de evaporação é praticamente o mesmo. A diferença reside na natureza da superfície da qual a água se evapora. Além disso, as moléculas de água têm que vencer maiores resistências para escapar do solo do que a água livre das superfícies.

Os fatores que controlam a evaporação são interdependentes. A pressão de vapor do corpo de água depende da temperatura da água e do ar, do vento, da pressão atmosférica, da qualidade da água (sais dissolvidos) e da natureza e forma da superfície, como é mostrado nos próximos itens.

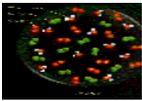
2. Temperatura

Para uma dada temperatura, se não há vento (isto é, se o ar que cobre a superfície de evaporação não é constantemente trocado), a evaporação ocorre até que a pressão de vapor no ar atinja a pressão de vapor de saturação. Quando este equilíbrio é atingido, a evaporação cessa.

Um acréscimo da temperatura *global do sistema* (água e ar) provoca o aumento da energia cinética das moléculas de água e conseqüentemente aumenta a pressão de vapor do corpo de água. Por outro lado, quanto mais quente o ar maior é a quantidade de vapor de água que pode ser “retido” por ele. Dessa forma, se não há aumento simultâneo da ventilação (considerando o efeito do aumento de temperatura isoladamente), a *taxa de evaporação* aumentará *apenas nos primeiros instantes*, até que o ar em torno da superfície incorpore água o suficiente para retomar a condição anterior de equilíbrio.

Relembrando:

- A temperatura relativa à máxima quantidade de vapor de água que o ar



pode sustentar é dada pelo chamado ponto de orvalho.

- Vapor representa o estado gasoso da água na faixa de temperatura em que, fixando-se a temperatura consegue-se liquefazer a água aumentando-se apenas a pressão.

3. Umidade

A umidade relativa do ar é a quantidade de vapor de água que existe no ar comparada com a máxima quantidade de água que o ar pode “reter” numa dada temperatura.

Se a umidade relativa é 100%, diz-se que o ar está saturado e a quantidade de moléculas de água que escapam da superfície do corpo de água é igual à quantidade de água que volta ao estado líquido. Ou seja, não há mais evaporação na condição de saturação.

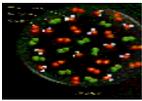
4. Pressão atmosférica

A diminuição da pressão barométrica com o aumento da altitude deve aumentar a taxa de fuga das moléculas da superfície de água livre.

Isso ocorre porque, com a pressão atmosférica menor, as moléculas de água que escapam podem ficar mais afastadas entre si que numa situação de pressão atmosférica maior. Assim, será necessária uma quantidade maior de moléculas para atingir a condição de saturação numa mesma temperatura.

5. Velocidade média do vento

A evaporação também ocorre com maior facilidade em regiões onde a movimentação das camadas de ar é mais freqüente. O vento retira as moléculas de água vaporizadas que estão sobre a superfície do corpo de água (rio, lago, etc.) impedindo que as mesmas venham condensar naquela superfície. Assim, a taxa de condensação cai e a evaporação é maior que numa situação de massas de ar estagnadas.



Entretanto, quando a velocidade do vento é grande o suficiente para remover todas moléculas de água escapadas da superfície de água, um futuro aumento da velocidade não aumentará a evaporação apreciavelmente. O efeito do vento na evaporação pode ser menos pronunciado sobre grandes superfícies de água do que em pequenas áreas.

6. Sólidos solúveis

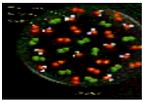
A pressão de vapor da água pura sob certas condições é determinada por sua temperatura. Quando um soluto é dissolvido na água, a pressão de vapor da solução é reduzida. Como a taxa de evaporação é proporcional à diferença em pressão de vapor entre a água e a atmosfera, esse abaixamento da pressão de vapor da água pela presença do soluto poderá reduzir a evaporação.

7. Umidade e natureza do solo

Para um valor determinado do poder evaporante da atmosfera (vento, temperatura, etc.), a taxa de evaporação do solo é função da quantidade de água contida na camada superficial do solo e da facilidade de sua substituição pela água do lençol freático. Essa substituição depende da porosidade do solo e de seu arranjo físico.

8. Transpiração nos vegetais

A transpiração é essencialmente igual à evaporação. Entretanto, as moléculas de água escapam não de uma superfície livre, mas sim de estruturas vegetais denominadas estômatos. Os estômatos são muito comuns nas partes verdes aéreas das plantas, particularmente nas folhas que são pequenos orifícios situados nas folhas (em um ou em ambos os lados, embora mais freqüentemente no lado de baixo). O vapor d'água é liberado através dessas estruturas que ficam localizadas entre as chamadas células-guarda, responsáveis pelo seu controle de abertura e fechamento. O número de estômatos nas folhas variam entre 8 e 120 por cm^2 , dependendo da espécie da planta e das condições ambientais como umidade, calor e umidade do solo.



Os fatores que afetam a transpiração podem ser:

Fisiológicos: Fatores fisiológicos importantes são densidade e comportamento dos estômatos, extensão e características das coberturas de proteção, estrutura da folha, e plantas doentes.

Ambientais: Os fatores ambientais essenciais incluem temperatura, radiação solar, ventos e umidade do solo.

Desde que a perda de água da planta é governada pela diferença em pressão de vapor de água do espaço abaixo do estômato e da atmosfera, o déficit de pressão de vapor de água do ar é a principal causa de transpiração.

9. Determinação da transpiração

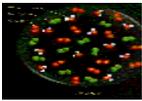
Para pequenas plantas, a transpiração pode ser medida em curtos períodos colocando a planta num container fechado e medindo-se então a mudança de umidade do container.

Uma maneira mais prática de medir a transpiração é através do fitômetro. Consiste num vaso largo cheio de terra no qual uma ou mais plantas são cultivadas. A superfície do solo é selada para evitar a evaporação, tornando então o único escape possível da umidade pela transpiração, que pode ser determinada pela perda de peso da planta e do vaso. Este método dá resultados satisfatórios, pois as condições de teste são comparáveis com o meio ambiente natural sob investigação. Podem ser utilizados pequenos fitômetros contendo somente água em vez de solo.

A transpiração pode também ser determinada por estudos da bacia hidrográfica.

10. Evapotranspiração real

Refere-se à perda de água por evapotranspiração de uma superfície em quaisquer condições de vegetação e suprimento de água.



11. Imprecisão dos tanques

Tanto teoricamente quanto praticamente já está evidenciado que a evaporação, a partir de um recipiente, difere substancialmente da que ocorre na superfície de um reservatório, sobretudo devido à diferença de temperatura da água nos dois casos. O pequeno volume de água no tanque e o metal do qual é feito o tanque exposto ao sol, contribuem para substanciais variações de temperatura da água, à medida que se altera a temperatura do ar e a radiação solar. A grande massa de água em um lago e o efeito estabilizador das correntes de convecção e do solo em função do reservatório tem como conseqüência uma amplitude muito menor na variação das temperaturas.

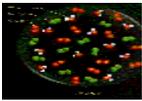
Inúmeras tentativas têm sido feitas para conceber um recipiente que seja o modelo térmico de um lago. Um estudo recente sobre a correlação entre a evaporação anual em um lago e a evaporação em um tanque de evaporação, mostrou que o coeficiente k tem um valor médio próximo de 0.7 (variando de 0.67 a 0.81), com todas as determinações da evaporação anual bastante criteriosas, feitas em tanque Classe A.

A grande desvantagem na utilização do coeficiente de tanque k é que ele depende de tantos fatores que variam com o tempo e com o local, que é praticamente impossível determiná-lo com precisão.

12. Desvantagens do método do balanço hídrico

O método do balanço hídrico, embora possua a vantagem de uma teoria simples, possui as seguintes desvantagens:

- a.) Se a entrada e saída de água do sistema forem muito grandes em relação à evaporação, grandes erros na estimativa de evaporação podem ser cometidos.
- b.) Existe uma grande dificuldade nas determinações da drenagem profunda baseada nas relações fluxo-gradiente, que, reconhecidamente são pouco precisas.



Teoricamente, é possível usar o método do balanço hídrico para determinar a evaporação de qualquer lago ou reservatório. Praticamente, no entanto, isto é dificultado pelos efeitos dos erros na medição de várias parcelas da equação. A evaporação determinada por este método é um termo residual e pode estar sujeita a erros consideráveis se for uma parcela pequena comparada com os outros termos.

Os experimentos realizados no Lake Hefner concluíram que a utilização deste método é pouco recomendável e que se o método for aplicado o tempo de estimativa deve ser de, no mínimo, um mês de duração