

R · E · V · I · S · T · A

indústria da água

GESTÃO

A GESTÃO DOS SISTEMAS DE ÁGUA E SANEAMENTO EM PORTUGAL

João Bau

SANEAMENTO

AMPLIAÇÃO E MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA DE SANEAMENTO DE LISBOA

António Curto

A ÁGUA E A BIOSFERA: (II)

A TRANSPIRAÇÃO DAS PLANTAS

Prof. Dr.º Adélio A. S. C. Machado

No artigo anterior discutiu-se o papel da água, a par do dióxido de carbono, como reagente básico da fotossíntese, uma das reacções fundamentais para a sustentação da vida; referiu-se que a utilização da substância nesta reacção implica a mobilização pelas plantas terrestres de grandes caudais de água do solo e o seu lançamento na atmosfera, por um processo específico chamado *transpiração*, uma das numerosas e complexas interacções que ocorrem à superfície da Terra, na interface solo - vegetação - atmosfera; e demonstrou-se que o caudal global de transpiração é tão grande que afecta decisivamente o ciclo da água, que, por isso, deve ser considerado um ciclo biogeoquímico.

O presente artigo apresenta mais detalhes sobre a transpiração: numa primeira secção contrasta-se o significado dos termos *evapotranspiração* e *transpiração*; a seguir, discute-se o mecanismo da transpiração e o seu tratamento hidrológico.

EVAPOTRANSPIRAÇÃO E TRANSPIRAÇÃO

A transpiração é um dos vários fenómenos que constituem a evapotranspiração. O termo *evapotranspiração* designa o conjunto de processos pelos quais a água existente à superfície dos continentes da Terra, no estado líquido ou sólido, passa para a atmosfera sob a forma de vapor: além da transpiração, que designa a evaporação a partir do interior das folhas das plantas, a evapotranspiração compreende a evaporação da água líquida a partir de lagos, rios, pântanos, solo e superfícies da vegetação e outras; e a sublimação da água sólida a partir de gelo e neve.

Em termos globais, a evapotranspiração diminui com a latitude do equador para os pólos, mas varia muito de região para região. A evapotranspiração excede o caudal nas bacias hidrológicas de quase todos os rios da Terra e, a nível continental, excede o caudal total dos rios para todos os continentes excepto a Antárctica. Cerca de 60% da água que cai sobre os continentes; sob a forma de chuva e neve é

evaporada, o que corresponde a um caudal global de $6,0 \times 10^{16}$ kg/ano. A evapotranspiração tem, portanto, um papel fulcral no ciclo da água, quer a nível continental, regional ou local, e o seu conhecimento é importante sob diversos pontos de vista. O mais fundamental é que a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração é o caudal de água naturalmente disponível para utilização pelo homem; por isso, a quantificação da evapotranspiração tem interesse, por exemplo, para a avaliação dos recursos hídricos e para o estudo dos efeitos nestes recursos das variações do clima e da utilização dos solos.

A maior parte do caudal evapotranspirado, cerca de 97%, tem origem no solo, sendo 3% apenas evaporado a partir de superfícies líquidas. Como a maior parte do solo dos continentes é recoberto, em maior ou menor extensão, por vegetação, esta tem uma influência marcante na evapotranspiração. O estudo desta influência merece presentemente muito interesse, sob diversos pontos de vista. Por exemplo: (I) grande parte da água evapotranspirada é usada no crescimento da vegetação que constitui a base dos ecossistemas terrestres e, por isso, o conhecimento das relações mútuas entre a evapotranspiração e a natureza dos ecossistemas é essencial para se prever a resposta destes às alterações de clima; (II) em particular, a maior parte dos alimentos humanos são produzidos em solos irrigados, constituindo a irrigação o maior consumo de água em quase todas as regiões e países em que se pratica agricultura; a aplicação eficiente da água na irrigação, isto é, o fornecimento da substância à medida e nas quantidades que forem necessárias, requer informação sobre o modo de utilização da água pelas plantas cultivadas.

Como a medição directa da evapotranspiração é muito difícil e dispendiosa, os hidrologistas desenvolveram uma variedade de métodos para a estimar a partir de grandezas hidrológicas vulgarmente medidas. Esses métodos baseiam-se na química-física das mudanças de fase, mais precisamente, das transições líquido-vapor e sólido-vapor e fundamentam-se nos princípios da conservação de massa e

TABELA 1

TIPOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E SUAS CARACTERÍSTICAS

Tipo	Superfície	Disponibilidade de água ¹	Uso de energia ² Armazenada Transportada pela água pelo ar		
Água corrente	Líquida aberta	Total (ar)	D	D	D
Lagos	Líquida aberta	Total (ar)	E	E	E
Transpiração	Folhas ou coberta	Limitada ou não (ar)	D	D	E
Intersecção	Folhas ou coberta	Limitada (folhas)			
		Total (ar)	D	D	E
Evapotranspiração potencial	Solo	Total (folhas)	D	D	D
		Limitada (ar)			
real	Solo	Limitada ou não (folhas)	D	D	E
		Limitada (ar)			

1) Entre parêntesis qualifica-se a disponibilidade, por exemplo Total (ar) significa disponibilidade total para passagem ao ar

2) D, desprezável; E, eventualmente envolvida

de energia. Os métodos usados para avaliar a evapotranspiração são variados, dependendo do tipo de superfície, da disponibilidade de água e da natureza da energia envolvida no processo, como se indica na Tabela 1. No presente contexto, interessam os dois casos que envolvem a vegetação, que são a transpiração e a intersecção pela coberta vegetal.

MECANISMO DA TRANSPIRAÇÃO

O termo transpiração designa a evaporação de água a partir *do interior* das folhas das plantas, isto é, do sistema vascular das plantas, para a atmosfera. A transpiração é um processo complexo, que envolve três etapas: (I) absorção de água do solo pelas raízes; (II) movimentação ascensional da água absorvida ao longo do sistema vascular das raízes, tronco, ramos e folhas, até atingir as paredes dos *estomas*, que são pequenas cavidades junto à superfície das folhas, onde ocorre a evaporação; finalmente, (III) libertação do vapor destas cavidades para a atmosfera através de pequenos canais abertos na superfície das folhas, os chamados *ostíolos*. Além da transferência de gases entre a

planta e a atmosfera, a transpiração proporciona o transporte de água necessária para manter a turgidez das células e o transporte de nutrientes dissolvidos do solo para os tecidos da planta.

A função principal dos estomas é proporcionar locais de captação do dióxido de carbono que as plantas utilizam para a fotossíntese. Este gás só pode entrar no organismo das plantas dissolvido em água. Nos estomas, ocorre a dissolução de dióxido de carbono do ar em água e a sua absorção pelas plantas, através das paredes. Concomitantemente com este processo ocorre evaporação de água para o ar (bem como a transferência para o ar do oxigênio produzido na fotossíntese).

O ar contido nos estomas tende a estar saturado de vapor de água, à pressão de vapor correspondente à temperatura da folha. A água movimenta-se das cavidades para o ar livre devido à diferença da pressão de vapor, tal como na evaporação a partir de uma superfície. No entanto, há uma diferença marcada entre a transpiração e a evaporação de água a partir de uma superfície: no primeiro caso, as plantas exercem um controlo fisiológico sobre o diâmetro dos ostíolos e, portanto, sobre a facilidade de movimento do vapor. Esse controlo

é realizado através das chamadas *células guarda*, que abrem ou fecham as aberturas dos ostíolos à superfície conforme as circunstâncias. Os principais factores que afectam a maior ou menor abertura das células guarda são a intensidade da luz solar (a maioria das plantas abre os estomas durante o dia e fecha-os à noite), a humidade (as aberturas fecham tanto mais quanto mais a humidade se afasta da correspondente à saturação) e o conteúdo de água das células das folhas (quando este é baixo, as aberturas fecham mais). Além destes, há outros factores que também influenciam a abertura: a temperatura, o vento, a concentração de dióxido de carbono no ar, a presença de substâncias poluentes no ar, etc..

A transpiração é um processo físico (não um processo metabólico!): a água do fluxo de transpiração é puxada através da planta pelos gradientes de energia potencial que são provocados pela perda das moléculas de água da planta para o ar pelos ostíolos, que ocorre em resposta à diferença de pressão de vapor de água no estoma e na atmosfera. A saída de vapor do estoma ocasiona a evaporação de água da respectiva parede para compensar a perda para o exterior e manter a saturação; esta perda de água líquida à superfície induz um movimento ascendente de substituição da água pelo sistema vascular, o qual, por sua vez, retira água do solo; por sua vez, esta perda de água produz um gradiente de concentração na região do solo adjacente à raiz, que tem como consequência o movimento da água do solo em direcção a esta. No entanto, as raízes procuram também a água, crescendo na direcção em que esta existe: na estação de crescimento, este é da ordem de algumas décimas de milímetro por dia. Para os fenómenos de ascensão da água no sistema vascular, tem muitas importância a forte coesão estrutural da água, devida às extensas ligações de hidrogénio, coesão essa que é responsável pelas elevadas viscosidade e tensão superficial da substância (ver o artigo *A estrutura da água, RIA*, número 14, Janeiro/Março de 1995, p. 61).

Os aspectos energéticos da transpiração são muito importantes. A evaporação de água nos estomas remove uma quantidade significativa de calor latente e não deixa subir demasiado a temperatura das folhas. Este controlo de temperatura é essencial, não só para impedir que as folhas sequem, como também para manter condições óptimas para a realização da fotossíntese. Por exemplo, para uma árvore de tamanho médio que transpira, como já foi referido no primeiro artigo desta série, 190 dm³/dia de água, o calor removido por transpiração é da ordem dos 400 kJ/dia. A energia despendida na ascensão de água através do sistema vascular das plantas também é apreciável: para a referida árvore de tamanho médio, se se admitir que a altura média das folhas com respeito às raízes é de 10m, facilmente se calcula que a energia gasta na "bombagem" de água do subsolo para as folhas é da ordem de 20kJ/dia.

MODELAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO

A transpiração, tal como a evaporação da água a partir da superfície de uma massa de líquido, é um processo difusivo que segue a primeira lei de Fick

$$E = K_e v_v (e_s - e_a) \quad (1)$$

em que E é a velocidade de evaporação (volume evaporado por unidade de superfície e por unidade de tempo, que tem as dimensões de uma velocidade, LT⁻¹), v_v é a velocidade do vento, e_s e e_a são, respectivamente, as pressões de vapor de água à superfície e no ar em contacto sobre ela, e K_e é um coeficiente que reflecte a eficiência do transporte vertical do vapor de água pelos turbilhões do vento.

O regime de fluxo do vento sobre a superfície terrestre é turbulento, devido ao atrito entre o ar em movimento e a superfície rugosa do solo (a espessura da camada de fronteira laminar junto à superfície é muito baixa, da ordem de 0,5 mm). Este atrito faz diminuir a velocidade do vento acima da superfície, isto é, estabelece-se um gradiente de quantidade de movimento (ver a Fig. 1). Este gradiente provoca uma descida de quantidade de movimento, implementada pelos turbilhões criados; as componentes verticais destes turbilhões movimentam va-

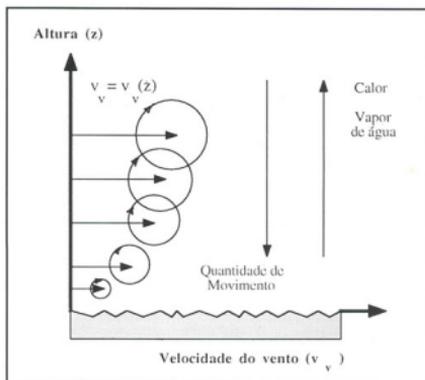


Fig. 1 - Esquema de transferência de vapor do solo para a atmosfera em regime de difusão turbulenta: o atrito causado pelo solo reduz a velocidade do vento junto à superfície (setas horizontais), provocando a formação de turbilhões (setas circulares), e transferência de quantidade de movimento de cima para baixo; a componente vertical dos turbilhões transporta vapor de água e energia no sentido dos respectivos gradientes (no sentido ascendente representado se o solo estiver mais húmido que a atmosfera e não houver inversão de temperatura)

por de água e energia calorífica na vertical.

Condutância atmosférica. A evaporação de água a partir de uma superfície pode ser expressa em termos de uma *condutância atmosférica*, por analogia com o que sucede num circuito eléctrico: tal como uma diferença de potencial aplicada a uma resistência eléctrica produz uma corrente eléctrica, a diferença de pressões de vapor entre a água à superfície e no ar provoca um fluxo de vapor de água através de algo análogo a uma resistência, cujo inverso é uma condutância, a chamada *condutância atmosférica* (ver a Fig.2A). Esta condutância dependerá da velocidade do vento e da eficiência dos turbilhões de vento à superfície para realizar o transporte de vapor, que depende da rugosidade da superfície. Um tratamento detalhado do assunto conduz à expressão

$$E = K_a C_a (e - e_a) \quad (2)$$

em que K_a é a chamada constante atmosférica ($K_a = 0,622 (p/P\rho_{aq})$), em que ρ_a e ρ_{aq} são as densidades do ar e da água, P é a pressão atmosférica e C_a é a condutância atmosférica, que tem as dimensões de uma velocidade (Lt^{-1}).

A vegetação tem uma influência importante sobre a condutância atmosférica, mais exactamente, afecta a variação de velocidade do vento que ocorre junto ao solo devido ao atrito. A velocidade do vento

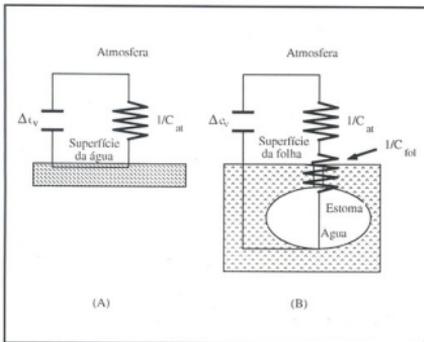


Fig. 2 - O fenómeno da evaporação da água (A) a partir da superfície de uma massa de líquido e (B) na transpiração das folhas, expresso em termos de resistências, $1/C_a$ e $1/C_{af}$, definidas pelas respectivas condutâncias (C_a , condutância atmosférica, e C_{af} , condutância foliar). Δe_v é a diferença de pressão de vapor que provoca a vaporização de água da superfície de evaporação para a atmosfera

sobre a vegetação varia logaritmicamente com a altura segundo a chamada equação de distribuição de velocidades para fluxos turbulentos de Prandtl-von Karman, que foi formulada por via teórica.

$$v_v(z) = (u/k) \ln [(z - z_0)/z_0] \quad (z > z_0 + z_0) \quad (3)$$

em que u é a chamada *velocidade de fricção*, k é uma constante adimensional (chamada constante de von Karman), z é a altura acima do solo e z_0 e z_0 são, respectivamente, os chamados *deslocamento do plano zero e altura da rugosidade* (ver a Fig.3). A velocidade de fricção é dada por (τ/ρ_a) , em que τ é a força de atrito na superfície (força por unidade de área), determinada pelo fluxo de transporte vertical de quantidade de movimento (quantidade de movimento transportada por unidade de tempo e por unidade de área) e ρ_a é a densidade do ar. A velocidade de fricção mede a eficiência dos turbilhões; pode ser obtida por medição da velocidade do vento a uma dada altura, $z = z_m$,

$$u = kv_v(z_m) / \ln [(z_m - z_0)/z_0] \quad (4)$$

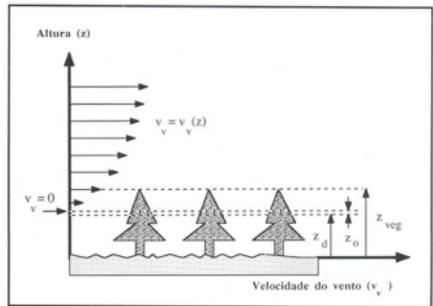


Fig. 3 - Efeito da vegetação na distribuição vertical da velocidade do vento: a distribuição segue a equação (3) do texto, sendo a velocidade nula para uma altura $z = z_0 + z_0$ acima do solo, em que z_{veg} é altura da vegetação (para os outros símbolos, ver texto)

A equação de Prandtl-von Karman mostra que $v_v(z) = 0$ para $z = z_0 + z_0$. O ajuste desta equação a dados experimentais, mostrou que $k = 0,4$ e que os parâmetros z_0 e z_0 são aproximadamente proporcionais à altura média da vegetação, z_{veg} , mais precisamente

$$z_d = 0,7 z_{veg} \quad (5)$$

$$z_0 = 0,1 z_{veg} \quad (6)$$

A vegetação provoca, portanto, a subida do nível de velocidade de vento nula do solo para a altura $z = 0,8 z_{veg}$, isto é, quase para o seu topo. Por exemplo, uma floresta atenua o vento à superfície do solo; esta é a razão pela qual os banhistas, quando encontram a praia ventosa, se deslocam para o pinhal adjacente, onde o vento é muito mais fraco!

Admitindo que a difusividade do vapor de água é igual à da quantidade de movimento, o que nem sempre é uma aproximação correcta, é possível provar que a condutância atmosférica é dada por

$$C_{at} = (v / \sqrt{6,25}) / \{ \ln [(z_m - z_0) / z_0] \}^2 \quad (7)$$

Considerando uma altura 2 m acima do topo da vegetação, $z_m = z_{veg} + 2$, a expressão anterior toma a forma

$$C_{at} = (v / \sqrt{6,25}) / \{ \ln [(2/z_{veg}) + 3] \}^2 \quad (8)$$

Esta expressão mostra que a condutância atmosférica, que varia linearmente com a velocidade do vento, aumenta com a altura da vegetação. A representação da função na Fig. 4 evidencia que a vegetação rasteira, constituída por arbustos e pequenas árvores, é particularmente eficaz no aumento da condutância atmosférica; e

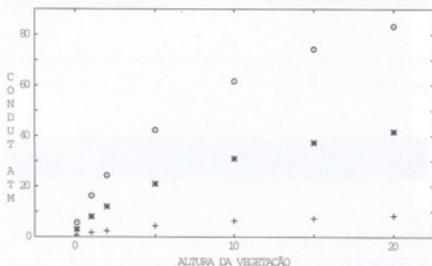


Fig. 4 - Variação da condutância atmosférica (C_{at} em cm/s) com a altura de vegetação (z_{veg} em m), para velocidade do vento (v) igual a (+) 1 m/s (*) 5 m/s (o) 10 m/s

mostra que, para condições climáticas vulgares, a condutância atmosférica tem valores entre algumas décimas e algumas dezenas de cm/s , isto é, pode variar num intervalo de duas décadas, conforme a altura da vegetação.

Condutância foliar. Enquanto a evaporação de água a partir de uma superfície envolve uma única etapa (passagem das moléculas de água da superfície para o ar), a transpiração é um processo mais complexo que consta de duas etapas: a primeira consiste na passagem da água do estoma para a superfície da folha, através do ostíolo; a segunda, na transferência da superfície da folha para a atmosfera. Neste caso, portanto, o fluxo de vapor de água tem de vencer uma segunda resistência, colocada em série com a que corresponde à condutância atmosférica (Fig. 2B), resistência essa que define a condutância foliar, C_{fol} .

A condutância foliar depende do número de estomas por unidade de área e da abertura dos respectivos ostíolos. O número de estomas por unidade de área varia entre 10 000 e 100 000, conforme a espécie. Quanto à abertura dos ostíolos, é controlada pelas plantas, através das células guarda, em resposta a múltiplos factores exteriores, já mencionados anteriormente. Até agora, só foi possível quantificar a influência na condutância foliar de quatro destes factores: intensidade da luz solar, diferença de pressão de vapor entre as folhas e o ar, temperatura das folhas e conteúdo de água das folhas. Segundo um modelo desenvolvido por Stewart (1989), que foi testado em diversas situações, a condutividade foliar é dada por

$$C_{fol} = C_{fol}^* \cdot G(K_m) \cdot G(\Delta p) \cdot G(T_s) \cdot G(\Delta \theta) \quad (9)$$

em que C_{fol}^* é o valor máximo da condutância foliar (ver adiante) e as funções G (factor) traduzem os efeitos de cada um dos quatro referidos factores ambientais na condutância foliar. Os factores são quantificados por grandezas hidrológicas vulgarmente medidas, respectivamente, o fluxo de radiação solar, K_m , o défice de humidade absoluta, Δp (diferença entre a humidade absoluta na saturação e a existente no ar, calculada a partir das pressões de vapor e da temperatura), a temperatura do ar, T_s , e o défice de humidade no solo, $\Delta \theta$ (diferença entre a capacidade de campo, o conteúdo de água que o solo retém por meio de fenómenos de capilaridade contra a força de gravidade, e o conteúdo na zona das raízes). As funções G (factor) são apresentadas na Tabela 2. As funções variam entre 0 e 1, mas a variação não é linear e difere de factor para factor.

A condutância foliar de árvores para o máximo de abertura dos ostíolos varia entre 0,2-0,4 cm/s para espécies de folha caduca e entre

TABELA 2

INFLUÊNCIA DE FACTORES AMBIENTAIS NA CONDUTÂNCIA FOLIAR (MODELO DE STEWART)

Factor	Grandeza e respectivo intervalo	Função
Luz solar	Intensidade de radiação solar $0 \leq K_{in} (J\ cm^{-2}\ s^{-1}) \leq 0,0100$	$G(K_{in}) =$ $= 11055K_{in} / (10007K_{in} + 104,4)$
Diferencial de pressão de vapor	Défice de humidade absoluta $0 \leq \Delta p (g\ m^{-3}) \leq 11,52$ $\Delta p_v (g\ m^{-3}) \oplus 11,52$	$G(\Delta p_v) =$ $= 1 - 0,0666 \Delta p_v$ $= -0,233$
Temperatura da folha	Temperatura do ar $0 \leq T_a(^{\circ}C) \leq 40$	$G(T) =$ $= T_a (40 - T_a)^{1,18} / 691$
Conteúdo de água na folha	Défice de humidade do solo $0 \leq \Delta \theta (cm) \leq 8,4$	$G(\Delta \theta) =$ $= 1 - 0,00119 e^{-0,81 \Delta \theta}$

0,1-0,8 cm/s para coníferas (pinheiros, ciprestes, abetos, etc.), caso em que aumenta substancialmente de ano para ano, devido ao crescimento das folhas (agulhas), como mostram os valores apresentados na Tabela 3.

TABELA 3

VALORES DA CONDUTÂNCIA FOLIAR PARA FLORESTAS DE CONÍFERAS

Tipo de vegetação ¹	C_{fol}^*
Abeto (c)	0,71
Abeto (-1)	0,45
Abeto (-2)	0,30
Pinheiro (c)	0,32
Pinheiro (-1)	0,23
Pinheiro (-2)	0,12
Pinheiro (-3)	0,11
Pinheiro (-4)	0,09

1) Entre parêntesis, indica-se o ano: c, ano corrente; -x, x anos antes.

Condutância da coberta. Uma superfície com vegetação, seja um relvado seja a coberta de uma floresta, pode ser considerada como

um conjunto de condutâncias foliares em paralelo. Por analogia com o que se passa com os circuitos eléctricos, a condutância total da superfície, a chamada *condutância da coberta*, C_{cob} , será a soma das condutâncias foliares em paralelo. Se a vegetação da superfície for razoavelmente homogénea, poderá ser assimilada a uma "folha gigante" com condutância total de vapor de água igual à soma das dos milhões de folhas individuais que a integram. A área total de transpiração é obviamente diferente da área do solo. A condutância da coberta é expressa por

$$C_{cob} = Lt C_{fol} \quad (10)$$

em que Lt é o chamado *índice folha-área de transpiração*, definido pela razão

$$Lt = A_f / A \quad (11)$$

em que A_f é a área total da superfície de transpiração sobre a área de solo A.

Na Tabela 4 apresentam-se valores do índice folha-área de transpiração para vários tipos de vegetação. O valor para as florestas de coníferas é muito elevado porque os estomas se distribuem por toda a superfície das agulhas das coníferas, enquanto que, por exemplo, nas árvores de folha caduca só há estomas na face inferior das folhas. É

TABELA 4

VALORES DO ÍNDICE FOLHA-ÁREA DE TRANSPIRAÇÃO PARA VÁRIOS TIPOS DE VEGETAÇÃO

Tipo de vegetação	Lt
Deserto	<1
Tundra	1
Savana	1 - 3
Floresta de árvores caducas 1	3 - 7
Floresta tropical	>9
Floresta de coníferas de zonas temperadas	10 - 47

1) Valor máximo anual

claro que para as florestas de árvores de folha caduca, a área das folhas varia ao longo do ano, aumentando de zero até ao valor máximo ao longo da estação de crescimento e voltando ao valor zero com a secagem e queda das folhas. Os valores incluídos na Tabela 4 para as florestas, em especial para as florestas tropicais e para as florestas de coníferas de zonas temperadas, são elevados e confirmam o seu importante papel na movimentação da água do solo para a atmosfera.

A equação de Penman-Monteith. A velocidade de evapotranspiração, ET, de uma superfície com vegetação é dada em função da condutância da cobertura pela equação de Penman-Monteith.

$$ET = [s(T_a)(K+L) + \rho_a c_a C_{at} e_{sat}(T_a)(1 - W_a)] / [\rho_{ag} \lambda_v \{s(T_a) + \gamma[1+(C_a/C_{cob})]\}] \quad (12)$$

em que $s(T_a) = (de_{sat}/dT)T = T_a$ é a derivada da curva de variação da pressão de vapor de saturação com a temperatura, $e_{sat}(T)$, à temperatura do ar, $T = T_a$, K é o fluxo global de energia de comprimento de onda baixo (energia recebida menos perdida, por unidade de área da superfície de evaporação e por unidade de tempo), L é o fluxo global de energia de comprimento de onda elevado, ρ_a e ρ_{ag} são as densidades do ar e da água, respectivamente, c_a é a capacidade calorífica do ar ($c_a = 0,24 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$), C_a e C_{cob} são as condutâncias da atmosfera e da cobertura, respectivamente, W_a é a humidade relativa, λ_v é o calor latente de vaporização da água, e γ é a chamada constante psicrométrica, dada

por $\gamma = c_p P / 0,6222 \lambda_v$, em que P é a pressão atmosférica. Esta grandeza não é realmente constante: a pressão atmosférica é função da altitude e varia ligeiramente com o tempo; e o calor latente de vaporização da água varia também ligeiramente com a temperatura. O valor da constante normalmente usado é $\gamma = 0,66 \text{ mb}^\circ\text{C}$, calculado para $c_p = 0,24 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $P = 1013 \text{ mb}$ e $\lambda_v = 590 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, mas se se aplicar a equação a locais de elevada altitude deve-se atender ao efeito do decréscimo da pressão.

A equação de Penman-Monteith pressupõe que o fluxo de energia transportada pela água é nulo e que não há armazenagem de calor, hipóteses que são geralmente válidas quando se considera uma cobertura vegetal. Na ausência de vegetação, quando $C_{cob} \rightarrow \infty$, o factor $1 + (C_a/C_{cob}) > 1$ e a equação reduz-se à equação de Penman para a evaporação a partir de uma superfície, por exemplo, a partir da superfície de uma massa de água:

$$ET = [s(T_a)(K+L) + \rho_a c_a C_{at} e_{sat}(T_a)(1 - W_a)] / \rho_{ag} \lambda_v [s(T_a) + \gamma] \quad (13)$$

A equação de Penman-Monteith permite avaliar a transpiração de áreas terrestres recobertas por vegetação, mas, devido à natureza empírica da grandeza C_{cob} , os seus resultados são de mais confiança quando é usada para comparar a transpiração de uma mesma zona em diferentes condições hidrológicas, por exemplo, para diferentes défices de humidade no solo.

CONCLUSÕES

O presente artigo mostra até que ponto se progrediu no estudo da transpiração, uma das complexas interacções que ocorrem na interface solo-vegetação-atmosfera, à superfície da Terra. Embora se tenha um conhecimento razoável do processo, tal conhecimento só permite aplicações práticas à escala local ou, quando muito, regional e será necessário muito trabalho adicional para se conseguir interpretar e descrever a transpiração a maior escala, continental ou global, e integradamente com as outras interacções à superfície da Terra. No artigo seguinte, vai-se tratar outra das interacções em que a fitosfera tem um papel importante e que afecta a evapotranspiração, a chamada intersecção da chuva pelas cobertas vegetais das florestas.

SUGESTÕES PARA LEITURA ADICIONAL

S. L. Dugman, "Physical Hydrology", Macmillan, 1994
E. Boecker e R. van Grondelle, "Environmental Physics",
Wiley, 1995