Departamento de Engenharia de Biossistemas - ESALQ/USP
Prof. Quirijn

Balanço de energia de uma folha

Objetivo: **verificar quais são os fatores físico-ambientais que determinam a temperatura da folha de uma planta, como a temperatura da folha pode ser estimada e qual a sensibilidade da temperatura da folha aos parâmetros ambientais**

INTRODUÇÃO

Todos os organismos e objetos interagem com seu ambiente por processos de troca de energia, na forma de radiação, condução ou convecção. Em plantas, as funções metabólicas operam em temperaturas ideais. Por exemplo, a temperatura ótima para o processamento de CO_2 pelas enzimas fotossintéticas está em torno de 30 °C. Se a temperatura subir acima de 34 °C, inicia-se a desnaturação das enzimas, inibindo o desempenho ideal da folha. A planta é desenhada de tal forma a possibilitar a manutenção da temperatura da folha na faixa ideal, numa gama grande de condições ambientais. Verificamos como os fatores físico-ambientais afetam a temperatura de uma folha.

Inicialmente constatamos que, para que um sistema (nesse caso a folha) esteja em equilíbrio energético (ou: térmico), a quantidade de energia que entra deve ser igual à quantidade que sai. [é verdade isso? É possível imaginar um sistema] Se não houver equilíbrio energético, a temperatura da folha irá mudar (subir ou diminuir) até atingir o equilíbrio. Para folhas de plantas, apresentando uma espessura pequena e uma superfície específica (área por volume) grande, o equilíbrio é normalmente atingido rapidamente, digamos dentro de um minuto.

A seguir verificaremos quais são os componentes do balanço de energia de uma folha e como podemos calculá-los.

COMPONENTES DO BALANÇO DE ENERGIA DE UMA FOLHA

Radiação

1. Radiação recebida pela folha
   - Radiação solar direta incidente na folha, S_d (W m^{-2}). Para calcular a densidade de fluxo de radiação solar direta absorvida pela folha q_d (W m^{-2}), temos que considerar a absortividade da folha para a radiação solar (ondas curtas), a_c, e o ângulo de incidência do feixe de radiação solar direta, i ($i = 0°$ significa a posição da folha perpendicular aos raios solares). Então:

$$q_d = a_c \cos(i) S_d \tag{1}$$

   - Radiação solar indireta (difusa) incidente na folha, S_i (W m^{-2}). A fração da radiação solar que atinge a superfície como radiação difusa é dependente das condições atmosféricas e do ângulo zenital do Sol. A quantidade absorvida de radiação indireta q_i (W m^{-2}) independe da posição da folha. Assim:

$$q_i = a_c S_i \tag{2}$$

- Radiação terrestre (ondas longas) incidente na folha, R (W m^{-2}). Essa radiação está sendo absorvida pela folha de acordo com sua absortividade para ondas longas, $a^f{}_l$ e, da mesma forma que a radiação indireta, nas duas faces da folha:

$$q_r = 2a^f{}_l R \tag{3}$$

A radiação terrestre é emitida pelo ambiente, e sua intensidade pode ser calculada em função da temperatura do ambiente (T_a, K) de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \varepsilon^a{}_l \sigma T_a^4 \tag{4}$$

onde $\varepsilon^a{}_l$ é a emissividade para ondas longas do ambiente e σ (W m^{-2} K^{-4}) é a constante de Stefan-Boltzmann. Pela Lei de Kirchhoff, emissividade e absortividade de uma superfície para um determinado comprimento de onda são iguais. Considerando ainda que a maioria das superfícies terrestres possui uma emissividade para ondas longas alta, em torno de 0,96, é razoável supor que

$$a^f{}_l = \varepsilon^a{}_l = \varepsilon_l \tag{5}$$

onde o parâmetro ε_l representa a emissividade para ondas longas de superfícies terrestres. Combinando as equações 3, 4 e 5, encontramos:

$$q_r = 2\varepsilon_l^2 \sigma T_a^4 \tag{6}$$

2. Radiação emitida pela folha
   - Radiação (ondas longas) está sendo emitida pela folha nas suas duas faces. A densidade de fluxo dessa radiação (q_e, W m^{-2}) pode ser calculada em função da temperatura da folha (T_f, K) de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann:

$$q_e = 2\varepsilon_l \sigma T_f^4 \tag{7}$$

Diferenças substanciais em valores de ε_l não ocorrem entre folhas, sendo a superfície vegetal considerada normalmente como um emissor quase perfeito com $\varepsilon_l = a_l = 0{,}96$. Contrariamente, diferenças na absortividade de ondas curtas (a_c) ocorrem, sim, entre espécies, dentro do ciclo de desenvolvimento da planta ou dentro de uma mesma planta entre folhas mais novas e mais velhas. O efeito dessa variação na absortividade na temperatura de equilíbrio da folha é significativo. As plantas podem também reduzir a quantidade de radiação absorvida mudando o ângulo das folhas em relação à radiação solar direta.

Condução/Convecção

Além da troca de energia por radiação, os processos de condução (difusão de energia por contato material entre dois corpos a diferentes temperaturas) e de convecção (fluxo de massa) têm um papel importante no balanço energético de uma folha. Ambos esses processos são proporcionais à diferença de temperatura entre folha e ar, e podem portanto ser tratados simultaneamente. Assim, a densidade de fluxo de energia entre folha e ar pelo processo de convecção-conduçao pode ser calculada como (Lei de Fourier):

$$q_c = K_{ar} \frac{(T_f - T_a)}{d_{cl}} \tag{8}$$

onde K_{ar} (W m K^{-1}) é a condutividade convectiva-condutiva do ar (parâmetro que quantifica a facilidade do ar em conduzir energia térmica) e d_{cl} (m) é a espessura da "camada limite", a camada de transição de temperatura ao redor da folha. A espessura d_{cl} depende do tamanho e do formato da folha, além da velocidade do vento, e pode ser estimada pela expressão empírica

$$d_{cl} = k_f \sqrt{\frac{w}{v}} \tag{9}$$

onde k_f (m $s^{-0,5}$) é um parâmetro empírico do formato da folha, w (m) é a largura da folha e v (m s^{-1}) é a velocidade do vento.

Energia Latente: Transpiração

A troca de energia pelo processo evaporativo também contribui significativamente para o balanço de energia das folhas. A quantidade de energia assim transferida (q_l, W m^{-2}) pode ser calculada conforme

$$q_l = 1{,}157.10^{-8}\, T L_v \rho_{água} \tag{10}$$

onde T (mm d^{-1}) é a taxa de transpiração, L_v (J kg^{-1}) é o calor latente específico de evaporação ($L_v = 2{,}45.10^6$ J kg^{-1}) e $\rho_{água}$ é a densidade da água (1000 kg m^{-3}). O fator $1{,}157.10^{-8}$ é o fator de conversão entre mm d^{-1} e m s^{-1} (1 mm d^{-1} = $1{,}157.10^{-8}$ m s^{-1}).

O BALANÇO

O balanço final de energia da folha é escrito como:

$$q_d + q_i + q_r = q_e + q_c + q_l \tag{11}$$

onde q_d (eq. 1), q_i (eq. 2), q_r (eq. 6), q_e (eq. 7), q_c (eq. 8) e q_l (eq. 10) podem ser calculados como acima. Desses termos, q_e e q_c são dependentes da temperatura da folha T_f e a equação 11 equivale a

$$-q_e - q_c - q_l + q_d + q_i + q_r = 0 \Leftrightarrow -2\varepsilon_l \sigma T_f^{\ 4} - K_{ar}\frac{(T_f - T_a)}{d_{cl}} - q_l + q_d + q_i + q_r = 0 \tag{12}$$

DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO

Utilizando a equação 12, não há uma forma analítica de se calcular T_f, pelo fato de T_f aparecer nas potências 4 e 1 simultaneamente. Uma forma de resolver o problema é utilizando o *método de Newton-Raphson*, que consiste na aproximação do valor de T_f por método iterativo, como descrito a seguir.

Chamamos

$$F(T_f) = -2\varepsilon_l \sigma T_f^{\ 4} - K_{ar}\frac{(T_f - T_a)}{d_{cl}} - q_l + q_d + q_i + q_r \tag{13}$$

e procuramos o valor de T_f para qual $F(T_f)$ é igual a zero (equação 12). Da equação 13 segue

$$\frac{dF}{dT_f} = -8\varepsilon_l \sigma T_f^{\ 3} - \frac{K_{ar}}{d_{cl}} \tag{14}$$

Pelo método de Newton-Raphson (veja também figura 1):

(1) Faz-se uma estimativa do valor de T_f ($T_{f,1}$). p.e., tomando $T_{f,1}$ igual a T_a.

(2) Calcula-se o valor de $F(T_{f,1})$ – eq. 13 e de dF/dT_f – eq. 14

(3) Faz-se uma nova estimativa de T_f ($T_{f,2}$) conforme

$$T_{f,2} = T_{f,1} - \frac{F(T_f)}{dF/dT_f} \tag{15}$$

(4) Repetem-se os passos (2) e (3) até o valor de T_f não variar mais, o que ocorre normalmente em 3 ou 4 iterações.

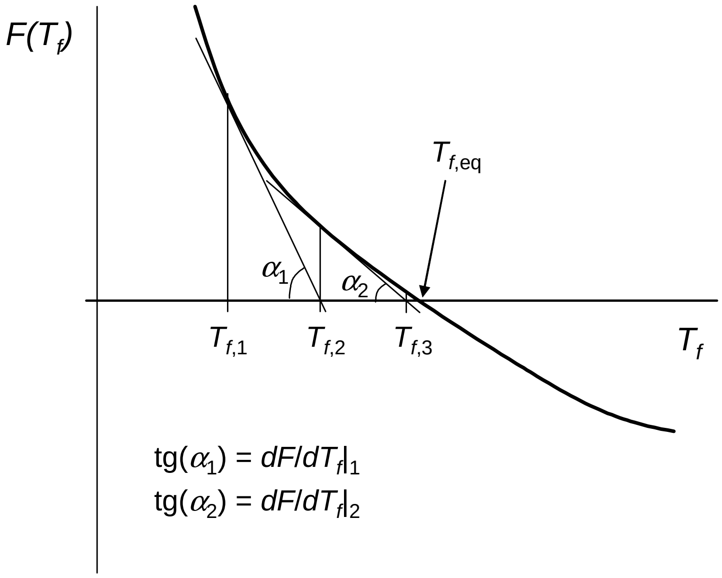

Figura 1 - Representação esquemática do método iterativo de Newton-Raphson para encontrar o valor da temperatura de equilíbrio $T_{f,eq}$ a partir de uma estimativa inicial $T_{f,1}$

Tabela 1 - Valores de algumas constantes e faixas de valores normais para os fatores ambientais para o cálculo da temperatura de equilíbrio de uma folha.

Parâmetro / Constante	Símbolo	valor	Unidade
Stefan-Boltzmann	σ	$5{,}67 \cdot 10^{-8}$	$W\ m^{-2}\ K^{-4}$
Calor latente de evaporação	L_v	$2{,}450 \cdot 10^{6}$	$J\ kg^{-1}$
Condutividade térmica ar	K_{ar}	0,0259	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
Absortividade ondas curtas	$a_c = \varepsilon_c$	0,4 – 0,6 (0,5)	-
Absortividade ondas longas	$a_l = \varepsilon_l$	0,96	-
Fator formato da folha	k_f	0,004 – 0,006 (0,004)	$m\ s^{-0,5}$
Temperatura do ar	T_a	5 – 35 (25)	°C
		baixo – médio - alto	
Velocidade do vento	v	0,2 – 1,0 - 4,0	$m\ s^{-1}$
Radiação total	S	200 – 500 - 800	$W\ m^{-2}$
Radiação direta	S_d	90 a 10% do S	$W\ m^{-2}$
Radiação difusa	S_i	10 a 90% do S	$W\ m^{-2}$
Ângulo foliar	I	0 – 45 - 90	°
Largura da folha	w	0,03 – 0,1 - 0,5	m
Transpiração (por área foliar)	T	1 - 3 - 5	$mm\ d^{-1}$

ROTEIRO

Um estudo de sensibilidade tem como objetivo verificar qual é a resposta de um modelo a alterações nos parâmetros de entrada. Em função da análise de sensibilidade pode-se concluir a respeito da importância relativa dos parâmetros de entrada, e com qual precisão eles devem ser conhecidos ou determinados para se conseguir uma certa precisão do resultado.

Escolha (pelo menos) um dos parâmetros da parte de baixo da Tabela 1. Calcule a temperatura de equilíbrio da folha pelo método descrito acima (opcionalmente: desenvolva uma planilha para fazer esse cálculo) para os três valores (baixo-médio-alto) desse parâmetro, utilizando para os demais o valor médio da tabela (utilize o valor entre parênteses onde indicado). Eventualmente calcule mais dois valores intermediários. Com os resultados, desenhe um gráfico da temperatura de equilíbrio da folha versus o valor do parâmetro escolhido. Expresse a sensibilidade χ como o valor da derivada do gráfico resultante:

$$\chi = \frac{\Delta T_f}{\Delta parâmetro} \tag{16}$$

Discuta o resultado.

Responda ainda as seguintes questões:

1. Demonstrar que k_f (equação 9) tem unidade m $s^{-0,5}$.
2. Demonstrar a veracidade da equação 10.
3. De que forma(s) uma planta pode controlar a temperatura de suas folhas?
4. Discuta as diferenças que podem acontecer entre as folhas de uma planta e como essas podem afetar a temperatura.
5. Quais alterações ocorrem nos componentes do balanço energético de uma folha comparando o período diurno com o noturno?
6. Considerando como sistema (volume de controle) a folha junta com um volume de ar ao redor dela, discuta os fluxos de energia entre sistema e meio, bem como os processos de transformação de energia interna que ocorrem dentro do sistema.