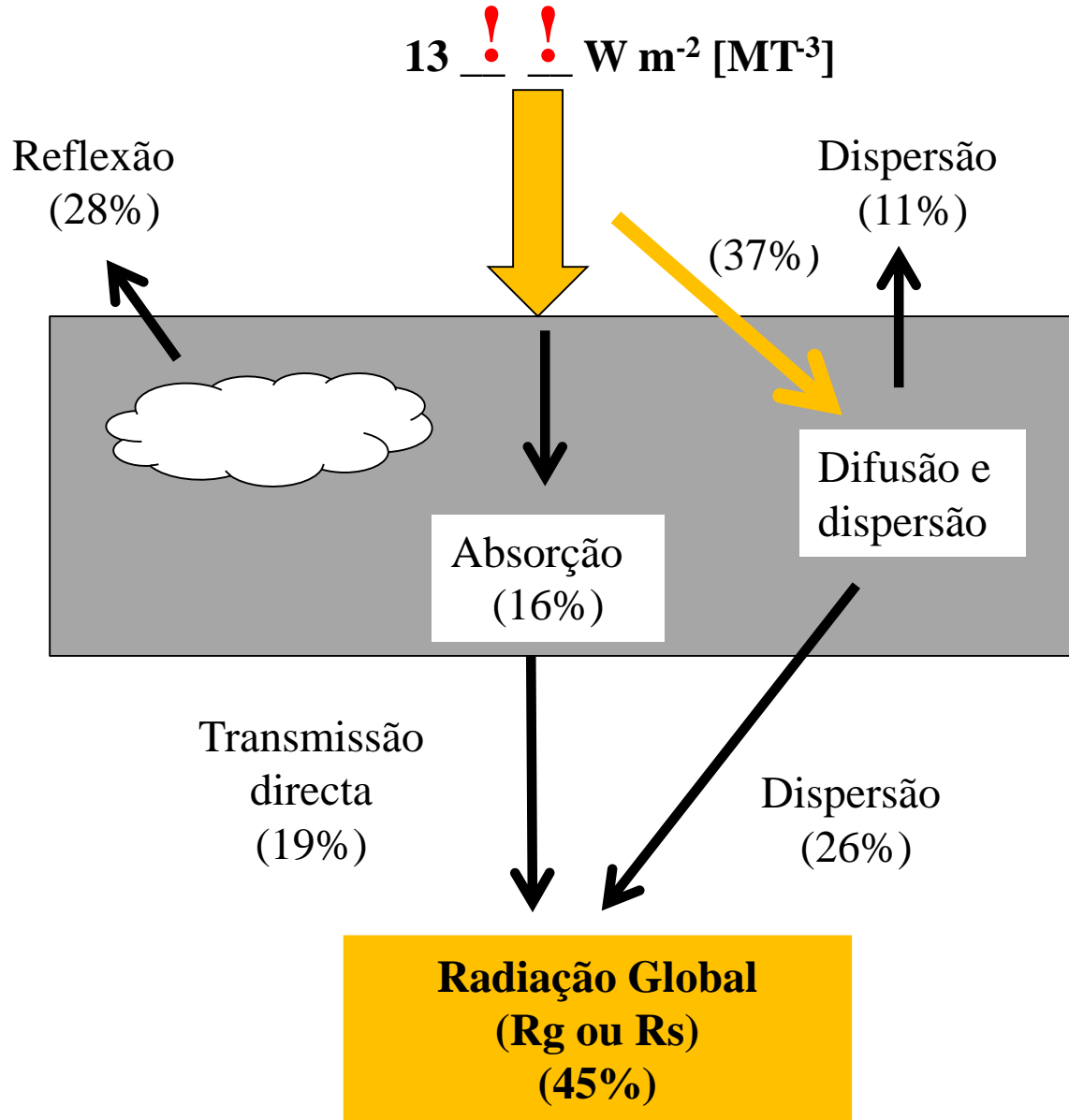
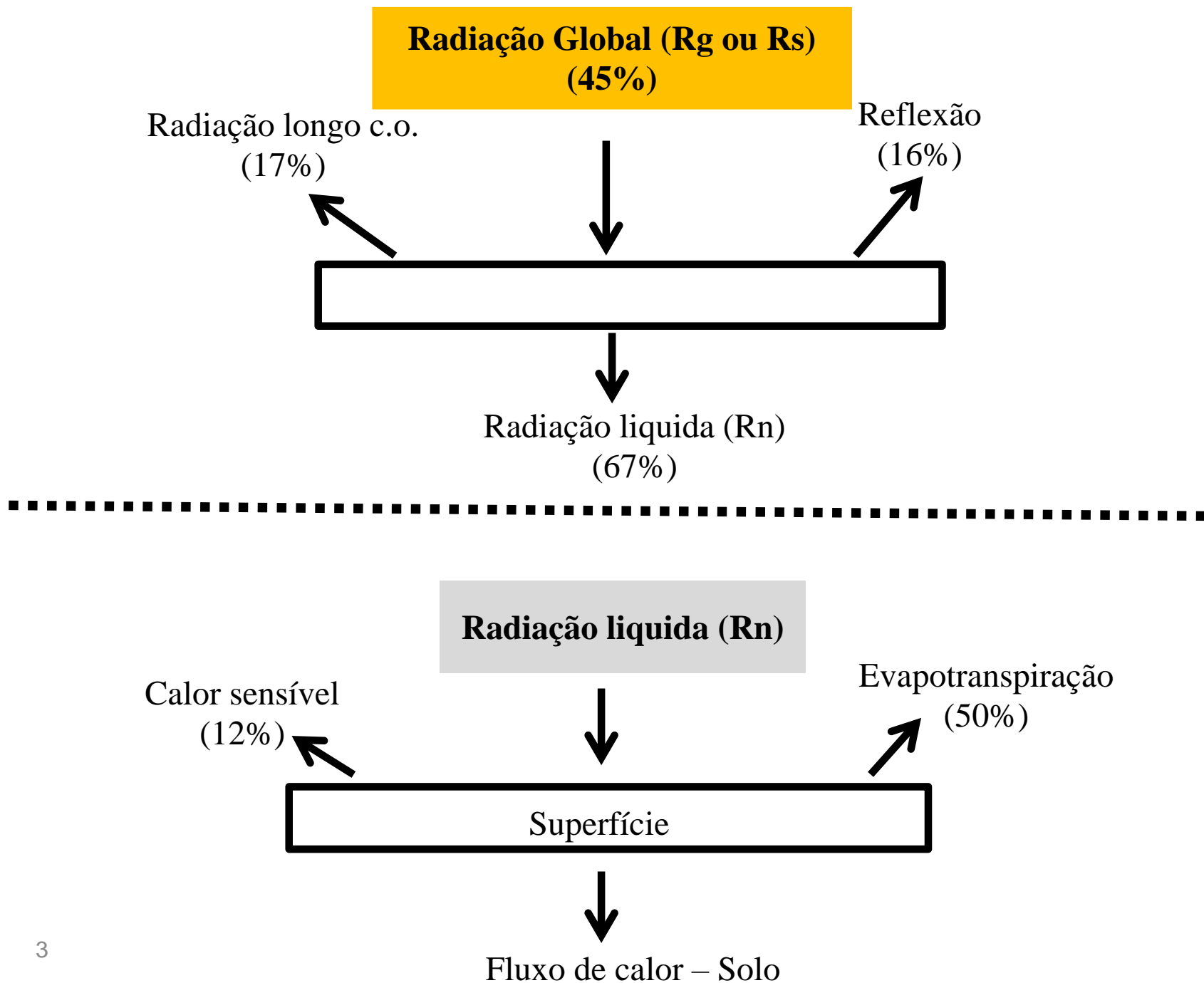


Balanco Energético

Radiação Topo Atmosfera Terrestre (R_a)





Radiação =

Emissão de energia sob a forma de ondas electromagnéticas, (Todos os c.o. Integral)

$E = \epsilon \sigma T^4$
(>0K)

Poder emissivo máximo

$\lambda = 2900 / T$ [T – temperatura (K), λ – Poder emissivo máximo (μm)]

Terra = 300 K → pico aos “10” μm [3-50 μm] radiação terrestre, calor, longo c.o.

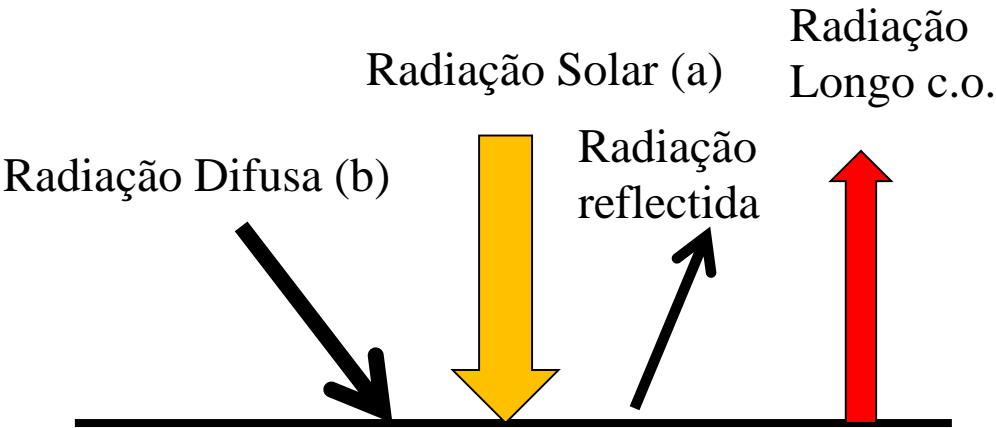
Sol = 6000 K → pico aos “ 0,5” μm [0,3-3 μm] radiação solar , curto de c.o.

Intensidade da energia emitida em função do c.o. e temperatura

$E\lambda = C_1 / \lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]$

Radiação Global (Rg ou Rs) = (a)+(b)

Radiação líquida (Rn ou R) = $R_s\uparrow - R_s\downarrow + R_l\downarrow - R_l\uparrow$



A relação entre as fontes de energia e os consumidores de energia pode ser representada através dos termos do Balanço Energético:

(trocas de calor latente são mais importantes - 1/6 das transferências são trocas de $Q_{\text{sensível}}$ e 5/6 são trocas Q_{latente})

$$R_n + G + \lambda E + H + M + P \overset{(\cong 0)}{=} 0$$

R_n = Energia líquida da radiação solar (resultado balanço da radiação)

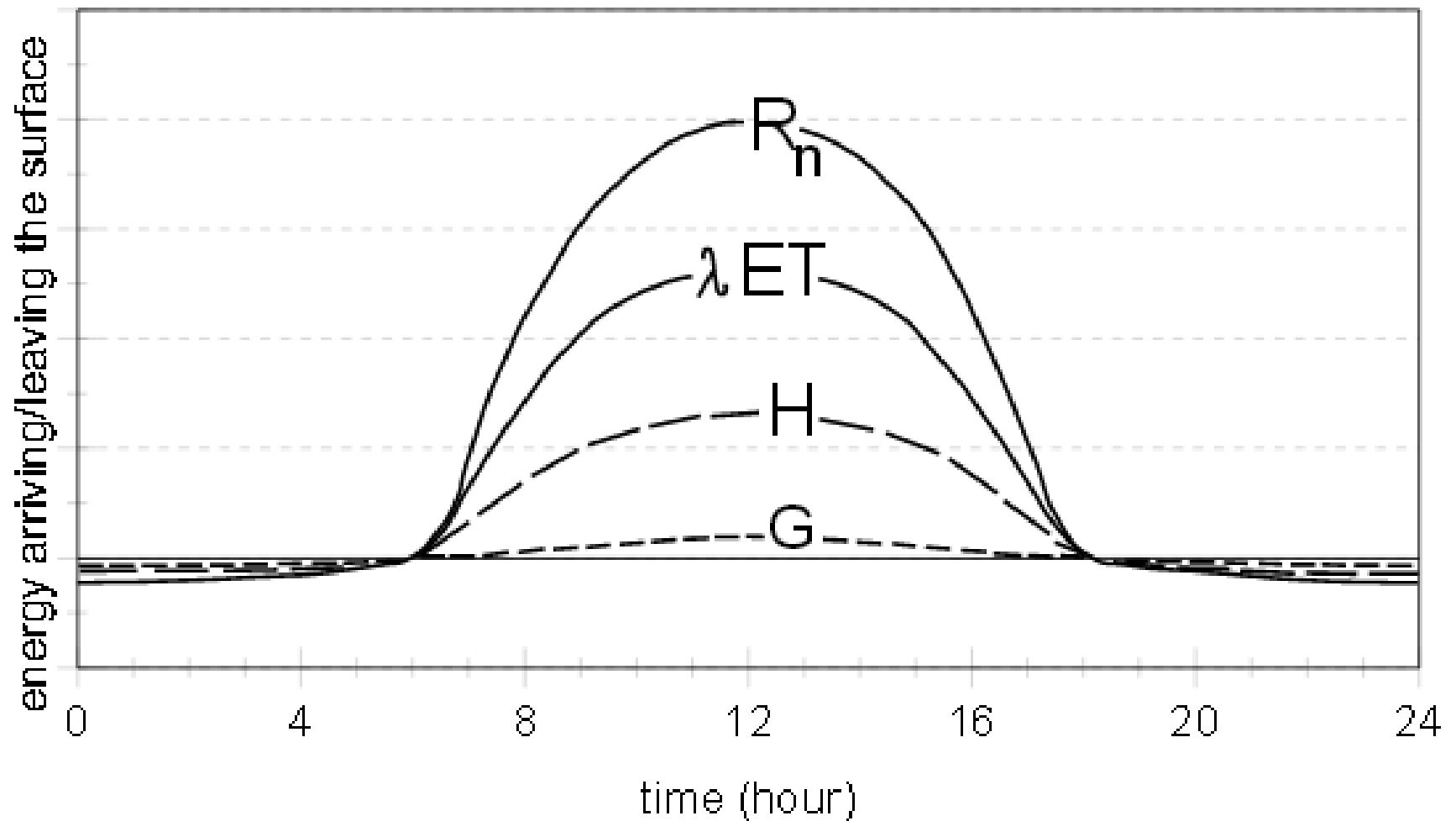
G = Fluxo de energia do solo

H = fluxo de calor sensível

λE = fluxo de calor latente

FIGURE 5

Schematic presentation of the diurnal variation of the components of the energy balance above a well-watered transpiring surface on a cloudless day



Rn= Energia liquida da radiação solar

Calculado através do balanço da radiação

$$R = R_n = (1-\alpha) (S_d + S_b) + \epsilon (L_d + L_e - L_r)$$

Ou

$$R = R_n = (1-\alpha) (S_t) + \epsilon (L_t - L_r)$$

G = Fluxo de energia do solo

Fluxos de calor estabelecem-se das zonas de altas temperatura para zonas de baixas temperaturas:

Fluxos positivos são dirigidos para a superfície

$$G = Q / At \quad \text{ou} \quad G = \textcolor{red}{-} K (\delta T / \delta Z)$$

A taxa de variação da energia armazenada no solo pode ser considerada nula para períodos iguais ou superiores a 1 ano.

K – condutibilidade térmica do solo em ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

$(\partial T / \partial Z)$ – gradiente térmico sem o qual não há transporte

Ex.

$$T_{\text{sup}} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{1,0 \text{ m}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$K = 1,4 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$$

$$\Delta T / L; \Delta T = T_2 - T_1 \text{ (Temperatura à sup. é } T_2)$$

$$G = - (1,4 \text{ W/m K}) (35 \text{ }^{\circ}\text{C} - 25 \text{ }^{\circ}\text{C} / 1,0 \text{ m})$$

$$G = - 14 \text{ W m}^{-2} \quad \textcolor{red}{\text{(Fluxo negativo, descendente)}}$$

H = Fluxo de calor sensível

$$H = \rho \cdot C_p \cdot K_H \cdot (\delta T / \delta Z),$$

onde:

ρ = massa volúmica ar

C_p = Calor específico do ar a pressão constante

K_H = difusibilidade turbulenta do ar para calor sensível

$(\delta T / \delta Z)$ = gradiente da temperatura

λE = Fluxo de calor latente

$$\lambda E = \rho \cdot K_w \cdot \lambda \cdot (\delta q / \delta Z),$$

onde

ρ = massa volúmica ar

K_w = Difusibilidade turbulenta do ar para o vapor de água

λ = Calor latente de vaporização

$(\delta q / \delta Z)$ = Gradiente de humidade específica

Energético ou Razão de Bowen:

Da equação do balanço energético é possível definir uma grandeza de forma

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad \Rightarrow \text{Razão de Bowen}$$

γ - constante psicrométrica ($0,066 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

ΔT - diferença de temperatura do ar

Δe - diferença de pressão de vapor (kPa)

$$R_n + G + \lambda E + H = 0$$

$$R_n + \lambda E + G + \beta \lambda E = 0$$

Fisicamente representa a razão entre o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente. Permite visualizar a percentagem de energia que é utilizada para a evaporação da água e para o aquecimento do ar.

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \beta}$$

$$H = \frac{\beta}{1 + \beta} (R_n - G)$$

Evapotranspiração

O ciclo hidrológico

é uma sequência fechada de diversos fenômenos naturais responsáveis pela transferência de água no interior do Sistema Climático (Peixoto)

- 1 - Transferência de água na fase vapor do globo para a atmosfera, seja por evaporação da água dos mares, lagos, rios, geleiras ou áreas cobertas de neve, seja por evaporação da água existente nos solos, seja ainda através da transpiração das plantas;
- 2 - Condensação parcial do vapor de água da atmosfera em partículas líquidas e sólidas que ficam em suspensão no ar, em estado coloidal, formando aerossóis, que constituem as nuvens e o nevoeiro;
- 3 – Deslocação das nuvens (transporte de água nas fases vapor, sólida ou líquida) pelas circulações locais ou regionais dos ventos e pela circulação geral da atmosfera;
- 4 – Transferência de água nas fases líquida e sólida da atmosfera para o globo por precipitação e por deposição de hidrometeoros, como orvalho e geada, na superfície e nos corpos nela existentes;
- 5 - Retenção na superfície, escoamento e infiltração no subsolo da água no estado líquido, com absorção parcial pelo sistema radicular das plantas, e depósito em águas subterrâneas

Dos fenómenos físicos anteriores resultam quatro componentes fundamentais do ciclo hidrológico à escala global:

- precipitação,
- infiltração de água no solo,
- evaporação/ evapotranspiração e
- escoamento

Em zonas cobertas por vegetação outro componente do ciclo deve ser acrescentado - a interceção de água da chuva.

O ciclo hidrológico é formado por dois ramos distintos:

RAMO ATMOSFÉRICO onde predomina o fluxo de água no estado de vapor.

RAMO TERRESTRE onde predomina o fluxo na fase líquida e também na fase sólida (glaciares, etc..).

A energia que permite a circulação de água provém do Sol (energia solar).

Considerando qualquer dos fluxos como percentagem da precipitação média anual global (1040 mm), 20% da precipitação cai sobre os continentes e 80% sobre os oceanos;

da precipitação caída sobre os continentes, 14% evapora-se para a atmosfera e 6% escorre até aos oceanos; daqui, 86% (80% + 6%) da água é evaporada para a atmosfera, onde, por circulação atmosférica das massas de ar, 6% da água contida nas nuvens desloca-se, em termos líquidos, na direção inversa ao escoamento

Evaporação e evapotranspiração

Evaporação

Processo físico pelo qual uma substância transita do estado líquido para o estado gasoso.

Esta transição de fase ocorre sobretudo à superfície do globo, através dos oceanos, dos mares interiores, dos lagos, dos rios e dos solos.

Transpiração

Processo físico pelo qual a água líquida que os seres vivos contêm é transformada em vapor de água no ar em seu redor.

A evaporação e a transpiração exprimem-se em mm ou em $\text{gm}^{-2} \text{s}^{-1}$.)

Evapotranspiração (ET)

Processo combinado de evaporação a partir da superfície do solo e dos seres vivos (nomeadamente as plantas) e de transpiração através da superfície dos seres vivos.

As unidades são as da evaporação e da transpiração.

Evapotranspiração potencial (ETP)

Evapotranspiração que ocorre sempre que a taxa de perda de água não é influenciada pelo teor de água disponível à superfície do solo e das plantas, isto é, sempre que a disponibilidade em água não constitui fator limitante.

Por esta razão a evapotranspiração potencial é sinónimo de necessidade em água, a que permitiria ao solo manter permanentemente um grau ótimo de humidade correspondente à quantidade necessária para o bom desenvolvimento das plantas no solo.

Evaporação e evapotranspiração

Evapotranspiração real (ETR)

Evapotranspiração que ocorre em condições reais, isto é, de acordo com as características reais do solo e das plantas.

Evapotranspiração de referência (ET_0)

representa, na ausência de qualquer déficit hídrico, a taxa de evaporação de uma superfície extensa de uma cultura verde de 8 a 15 cm de altura, em crescimento ativo e que ensombra completamente o solo.

A Evapotranspiração Potencial num dado período resulta da multiplicação de ET_0 por um **coeficiente cultural (K_c)**, empírico, que varia com a cultura em questão, o seu estágio de desenvolvimento e, nalguma extensão, com a velocidade do vento e humidade do ar: **$ETP = K_c \times ET_0$**

A evaporação e a evapotranspiração são processos que ligam a Hidrosfera, a Litosfera e a Biosfera à Atmosfera e condicionam marcadamente o ritmo do Ciclo Hidrológico.

A evapotranspiração é ainda um parâmetro central no balanço hídrico do solo, influencia a energética da atmosfera e altera as características da massa de ar.

Evaporação e evapotranspiração

Calor latente (LE)

associado à evapotranspiração, é um parâmetro do Balanço Energético de uma superfície (solo, folha,..) e resulta da multiplicação aritmética da água evapotranspirada (ET) pelo respetivo calor latente de vaporização (λ) e, por isso, exprime-se em Wm^{-2}

A produtividade de muitas culturas está relacionada com a quantidade de água consumida (isto é, com a evapotranspiração):

$$B/T = D/DS$$

B »» quantidade de matéria seca produzida (Kg ha^{-1})

T »» quantidade de água transpirada (mm)

DS »» défice de saturação do ar (kPa)

K »» constante dependente da cultura em questão ($\text{Kg kPa há}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)

Evapotranspiração

Programação de rega

Desenho de sistemas de rega

Regulação de albufeiras

Planificação de recursos hídricos e usos do território

Bacias hidrográficas

Produção agrícola e florestal

Evaporação e evapotranspiração

Fatores de que depende a evapotranspiração

A disponibilidade em água



A disponibilidade em água depende sobretudo do **estado hídrico do solo** e do **coberto vegetal** ou ainda do **orvalho**, da **água intercetada** pelo coberto e da **irrigação** em certas áreas.

Fatores ligados às plantas



Entre os fatores ligados às plantas salientam-se a **resistência interna da planta** ao fluxo de água (que depende por sua vez do potencial de água e da temperatura da folha, da altura do dia, da radiação fotossinteticamente ativa, do estado de desenvolvimento e do tipo de planta), o **índice de área foliar** (que depende do estado de desenvolvimento e tipo de planta), o **tipo de coberto vegetal** (que depende da rugosidade da cultura e altura) e os **caracteres morfológicos** da planta (que dependem do tamanho, da pubescência e da cor da folha).

Fatores meteorológicos



Os mais importantes são:

a **radiação líquida** (que depende da altura do dia, da altura do ano e da nebulosidade)

a **advecção de calor sensível** (global, regional ou local)

o **vento** (dependente da circulação geral da atmosfera e da pressão)

a **humidade** (da qual depende o défice de saturação e a abertura estomática)

a **temperatura** (da qual depende, por sua vez, da tensão de saturação do ar, do calor latente de vaporização e da abertura estomática).

Evaporação e evapotranspiração

A evapotranspiração (ou a evaporação) pode ser estimada a partir de:

Métodos climatológicos

Métodos micro-meteorológicos

Método hidrológico

Evaporação e evapotranspiração

A evapotranspiração (ou a evaporação) pode ser estimada a partir de:

Métodos climatológicos

Thornthwaite [$ET = f(T_a, n.)$]

(T_a , Temperatura ar; , ϕ , densidade do fluxo radiante Wm^{-2})

Blaney-Criddle [$ET = f(T_a, HR, \phi)$]

$R_n = G + \lambda E + H$

↓ Estimar

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \tag{6}$$

Onde:

- ETo – Evapotranspiração de referência (mm d⁻¹);
- Δ – Declive da curva de pressão de vapor (KPa °C⁻¹);
- Rn – Radiação líquida à superfície da cultura (MJ m⁻² d⁻¹);
- G – Densidade do fluxo de calor do solo (MJ m⁻²d⁻¹);
- γ – Constante Psicrométrica (KPa °C⁻¹);
- T – Temperatura média do ar a 2m de altura (°C);
- U₂ – velocidade média do vento a uma altura de 2m (ms⁻¹);
- (e_s– e_a) – déficit da pressão de vapor (KPa);

An alternative equation for ET_o when weather data are missing

When solar radiation data, relative humidity data and/or wind speed data are missing, they should be estimated using the procedures presented in this section. As an alternative, ET_o can be estimated using the Hargreaves ET_o equation where:

$$ET_o = 0.0023 (T_{mean} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a \tag{52}$$

(Eto e Ra, mm day-1)

$$\text{equivalent evaporation [mm day}^{-1}] = 0.408 \times \text{Radiation [MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}] \tag{20}$$

Métodos micro-meteorológicos

Destacam-se os de **transporte de massa** [$E = f(T_a, HR)$], mais rigorosos para o cálculo da evaporação que da evapotranspiração, os métodos de **cálculo a partir do balanço energético**, sejam os baseados na relação de Bowen [$LE = f(R_n, G, H)$], sejam os que se baseiam na temperatura do coberto vegetal [$H = f(T_s, T_a, rH)$] ou ainda na determinação do fluxo de calor sensível pela correlação por turbulência [$H = f(w, T)$], os métodos **anemométricos** [$E = f(u, r_a, r_s, p_a)$] ou sem recurso ao cálculo das resistências da camada-limite [$E = f(q, V)$], os baseados na correlação por

Método hidrológico

É possível estimar a ET pelo **método do balanço hídrico** (ou método hidrológico) se forem conhecidos os valores (medidos) de precipitação (R), da irrigação (I_r) se for caso disso, da variação do teor de água no solo (Δs) e do escoamento (superficial – E_s, e subsuperficial - D):

$$ET = R + I_r + \Delta s + E_s \pm D$$

$$\Delta W = W_{in} - W_{out}$$

$$(\text{Variação Armazenamento}) = (\text{Ganhos}) - (\text{Perdas})$$

$$S = \int_o^z \int_{t1}^{t2} \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) dz dt$$

Durante periodos secos, $W_{in} = 0$, .. (sem I e P)

$$-\Delta S = DP + ET$$

Evaporação e evapotranspiração

Medição e estimativa da evapotranspiração - aspetos gerais

A evaporação é medida por evaporímetros (evaporímetro de Piche, evaporímetro de 250 cm² de boca e tina de evaporação de classe A)

Para medir a evapotranspiração usam-se lisímetros (evapotranspirómetros, lisímetros flutuantes e lisímetros de peso)

Evaporímetros (Evaporação)			
<u>Propriedade física medida</u>	<u>Tipos de evaporímetros</u>	<u>ALGUMAS CARACTERÍSTICAS</u>	
Nível de água na Tina (variações)	↑ Evaporímetro de Piche	↑ Tubo de vidro (invertido) com cerca de 1 cm de diâmetro; instalado em abrigos meteorológicos (padrão)	
	↑ Tina de Classe A	↑ Evaporímetro (diâmetro interno de 120 cm e altura de 25,5 cm); assente sobre estrado de madeira	
Peso do conjunto tina/água (variações)	↑ Evaporímetro de 250 cm ² de boca	↑ Tina de 250 cm ² de boca; assente sobre o prato de uma balança	
Lisímetros (Evapotranspiração)			
<u>Propriedade física medida</u>	<u>Tipos de lisímetros</u>	<u>ALGUMAS CARACTERÍSTICAS</u>	
Água drenada e precipitação	↑ Evapotranspirómetros ou lisímetros de drenagem	↑ A água é adicionada ao sistema para que o teor de água no solo permaneça constante; ET é a diferença entre a água aplicada e a soma da água drenada com a precipitação entretanto caída	↑ Medem a ETP (Evapotranspiração potencial)
Peso do conjunto solo/água (variações)	↑ Lisímetros de peso	↑ O contentor com o solo é pesado periodicamente (a pesagem pode implicar remoção do contentor ou o uso de sensores eléctricos); o peso é convertido em valores de ETR	↑ Medem a ETR
Altura (nível) do fluido onde assenta o lisímetro	↑ Lisímetros flutuantes	↑ Flutuam sobre líquidos como a água, óleo ou líquidos pesados (por ex., cloreto de zinco); o deslocamento do fluido devido ao lisímetro é medido com um manómetro e o seu peso é determinado usando o princípio de Arquimedes	↑ (Evapotranspiração real)

Medição da Evaporação

A evaporação é medida através de tanques evaporímetros e atmómetros.

Tanques de Evaporação

São tanques que contém água exposta à evaporação.

Um dos mais comum é o tanque Classe A



Consiste num tanque circular de aço inoxidável ou galvanizado, chapa 22, com 121 cm de diâmetro interno e 25,5 cm de profundidade.

Deve ser instalado sobre um estado de madeira, de 15 cm de altura, cheio de água até 5 cm da borda superior. O nível da borda não deve abaixar mais que 7,5 cm da borda superior, isto é, não deve ser permitida variação maior que 2,5 cm. A evaporação (EV) é medida com uma régua ou, de preferência, com o micrómetro de gancho assentado sobre o poço tranquilizador.

A Evaporação classe A é a espessura da lâmina de água do tanque que foi evaporada em um determinado intervalo e tempo.

Routineiramente, a leitura do nível de água do tanque é feita uma única vez ao dia, pela manhã. Quando se faz a leitura do nível de água, também se faz a leitura do anemómetro totalizador e do termómetro flutuante, de máxima e de mínima. Regista-se, assim, a velocidade do vento percorrido e a temperatura máxima e mínima da superfície evaporante. As alturas (lâminas) de evaporação são acumuladas em períodos semanais, quinzenais ou mensais, conforme a aplicação que se vai dar aos dados de evaporação. O estrado colocado no tanque classe A visa impedir o fluxo de calor para o solo.

Medição da Evaporação

A evaporação é medida através de tanques evaporímetros e atmómetros.

Atmómetros

São evaporímetros nos quais a evaporação de água ocorre através de uma superfície porosa.

A sua instalação e operação são relativamente simples, embora apresentem erros em razão da impregnação de sal ou poeira em seus poros, principalmente nos instrumentos com superfície porosa permanente.

Outro grande problema dos atmómetros é que eles são mais sensíveis ao vento do que à radiação solar.

Os principais tipos de atmómetros são:

Piche

consiste de um tubo de 22,5 cm de comprimento com 1,1 cm de diâmetro interno, graduado em décimo de milímetro, fechado em uma das extremidades.

Na extremidade aberta do tubo, prende-se um disco de papel de 3,2 cm de diâmetro, por meio de um anel. Ele é cheio de água destilada e pendurado na vertical, com a extremidade fechada para cima. A evaporação se dá através do disco de papel, e quantidade de água evaporada é determinada pela variação do nível de água no tubo.

- Livingstone (esfera oca de porcelana)

- Bellani (disco de porcelana)

Em postos meteorológicos padrão, o equipamento oficial para se medir a evaporação é o evaporímetro de Piche e não o tanque classe A, que inclusive pode não estar presente. O Piche fica à sombra, dentro do abrigo meteorológico, e é bem mais prático de manejar que o tanque.



Determinação da Evapotranspiração

Existem **métodos diretos** para determinação e **métodos indiretos** para a estimativa da evapotranspiração e cada metodologia apresenta características próprias.

Métodos Diretos

A) Lisímetros

São tanques enterrados no solo, dentro dos quais se mede a evapotranspiração.

A evapotranspiração é obtida por meio do balanço hídrico neste sistema de controle.

$$ET_0 = (I + P - D)/A$$

em que:

I – irrigação;

P – precipitação;

D – drenagem;

A – área do lisímetro.

