



ISA

Balanço Hídrico Fluxos

2024-2025

CLIMATOLOGIA E AGROMETEOROLOGIA

U LISBOA

UNIVERSIDADE
DE LISBOA



INSTITUTO
SUPERIOR DE
AGRONOMIA



Objetivos
da aula

Resolver exercícios sobre:

- Fluxos
- Balanço



ISA

1ª Parte - Balanço

2024-2025

CLIMATOLOGIA E AGROMETEOROLOGIA

Posso estimar a ETP?

$$ET_p = 16 \left(10 \frac{\bar{T}}{I} \right)^a \times f$$

**Método de
Thornthwaite**

$\bar{T}$: temperatura média mensal

I : somatório anual do índice térmico mensal i .

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad i = (0.2 \bar{T})^{1.514}$$

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 77.1 \times 10^{-6} I^2 + 17.92 \times 10^{-3} I + 492.39 \times 10^{-3}$$

$$f = \frac{N/12 \times N_d}{30}$$

N:insolação astronómica diária em horas
N_d: numero de dias em cada mês

Quadro 8.2 Valores da insolação astronómica diária em horas para o hemisfério norte.

INSOLAÇÃO ASTRONÓMICA DIÁRIA EM HORAS (N)													
Latitude	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Latitude
N													N
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	0
5	11.8	12.0	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	5
10	11.6	11.7	12.0	12.4	12.5	12.7	12.5	12.4	12.2	11.8	11.8	11.5	10
15	11.3	11.7	12.0	12.5	12.9	13.0	13.0	12.5	12.2	11.7	11.4	11.3	15
20	11.0	11.6	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.9	12.2	11.6	11.2	10.9	20
25	10.8	11.4	12.0	12.7	13.4	13.7	13.6	13.0	12.2	11.5	10.9	10.6	25
26	10.7	11.3	12.0	12.7	13.4	13.8	13.6	13.0	12.2	11.5	10.9	10.6	26
27	10.7	11.3	12.0	12.8	13.5	13.8	13.7	13.1	12.2	11.5	10.8	10.5	27
28	10.6	11.3	12.0	12.8	13.5	13.9	13.7	13.1	12.2	11.4	10.8	10.5	28
29	10.6	11.2	12.0	12.8	13.6	13.9	13.8	13.1	12.4	11.4	10.8	10.3	29
30	10.5	11.2	12.0	13.0	13.7	14.0	13.9	13.2	12.4	11.4	10.7	10.2	30
31	10.5	11.2	12.0	13.0	13.7	14.2	13.9	13.2	12.4	11.4	10.7	10.2	31
32	10.3	11.1	12.0	13.0	13.8	14.3	14.1	13.4	12.4	11.4	10.6	10.1	32
33	10.2	11.1	12.0	13.1	13.8	14.4	14.2	13.4	12.4	11.3	10.6	10.0	33
34	10.2	10.9	12.0	13.1	13.9	14.4	14.2	13.5	12.4	11.3	10.4	10.0	34
35	10.1	10.9	12.0	13.1	14.1	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.9	35
36	10.1	10.9	12.0	13.2	14.1	14.6	14.4	13.5	12.4	11.1	10.3	9.8	36
37	10.0	10.8	12.0	13.2	14.2	14.8	14.5	13.6	12.4	11.3	10.2	9.6	37
38	9.9	10.8	12.0	13.2	14.3	14.9	14.5	13.6	12.5	11.1	10.1	9.6	38
39	9.9	10.8	12.0	13.3	14.3	14.9	14.6	13.7	12.5	11.1	10.1	9.5	39
40	9.8	10.7	12.0	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.1	10.0	9.4	40
41	9.6	10.7	12.0	13.3	14.5	15.1	14.7	13.8	12.5	11.1	9.8	9.3	41
42	9.5	10.7	12.0	13.4	14.6	15.2	14.9	13.8	12.5	11.0	9.8	9.2	42
43	9.4	10.5	11.8	13.4	14.6	15.4	15.0	13.9	12.5	11.0	9.7	8.9	43
44	9.4	10.5	11.8	13.6	14.7	15.5	15.1	13.9	12.5	11.0	9.6	8.8	44
45	9.3	10.4	11.8	13.6	14.9	15.5	15.2	14.1	12.5	10.9	9.5	8.7	45
46	9.2	10.4	11.8	13.6	15.0	15.7	15.3	14.2	12.5	10.9	9.5	8.6	46
47	8.9	10.3	11.8	13.7	15.1	15.8	15.4	14.2	12.5	10.8	9.4	8.5	47
48	8.8	10.3	11.8	13.7	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.8	9.2	8.4	48
49	8.7	10.2	11.8	13.7	15.3	16.1	15.7	14.4	12.6	10.8	9.1	8.2	49
50	8.6	10.0	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.7	9.1	8.1	50

Calcula a evapotranspiração potencial (ET_p) mensal pelo método de **Thornthwaite** para as temperaturas indicadas e latitude de 39°

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Tmédia (30 anos)	11.6	12.7	14.9	15.9	18	21.2	23.1	23.5	22.1	18.8	15	12.4

$$ET_p = 16 \left(10 \frac{\bar{T}}{I} \right)^a \times f$$

$$i = (0.2 \bar{T})^{1.514}$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} i$$

$$f = \frac{N/12 \times N_d}{30}$$

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 77.1 \times 10^{-6} I^2 + 17.92 \times 10^{-3} I + 492.39 \times 10^{-3}$$

Tabela para o calculo do balanço hídrico

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
ET _P													
P													
P-ET _P													
L													
A													
ΔA													
ET _R													
D													
S													
ET _P – Evapotranspiração potencial P – Precipitação L – Perda potencial de água A – Armazenamento de água no solo							ΔA – Variação do armazenamento de água na camada de solo ET _R – Evapotranspiração real D – Défice hídrico S – Excedente hídrico						

Calculo do armazenamento da água no solo

Método de balanço hídrico de Thornthwaite-Mather,

Calculo da água disponível no solo (A) num determinado mês (j) : A_j

se:

- **mês é húmido** ($P_j - ET_{pj} \geq 0$)

$$A_j = \text{Min}[U, A_{j-1} + (P_j - ET_{p,j})]$$

$$L_j = -U \times \ln(A_j/U)$$

A_j - armazenamento de água disponível

U - Capacidade de água disponível

L_j - perda de água potencial do mês

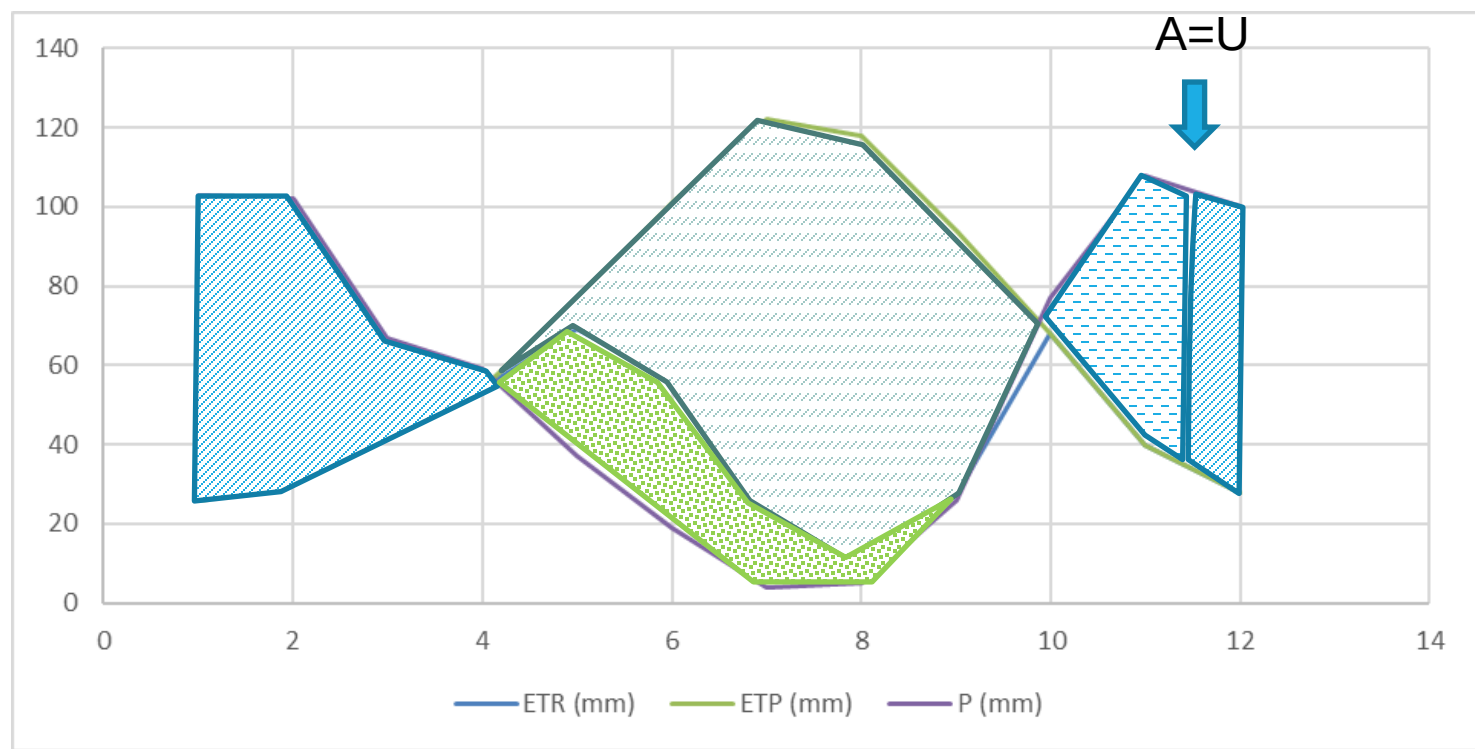
- **mês é seco** ($P_j - ET_{pj} < 0$)

$$A_j = U \times \exp\left(-\frac{L_j}{U}\right),$$

$$L_j = \sum_{k=n1}^j |P_k - ET_{p,k}|$$

$n1$ - primeiro mês do período seco

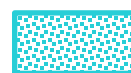
j - mês corrente



S



D



Extração de
água do solo



Reposição
de água
no solo

Exemplos balanço hídrico:

1. O valor médio da precipitação e evapotranspiração potencial no mês de **Abril** num determinado local são respetivamente $P=67\text{mm}$, $ETP=42\text{mm}$.

Calcula a variação da água armazenada no solo (ΔA), a perda potencial de água (L), e o excedente (S) sabendo que em Março $A=U$ (100mm).

$j=\text{Abril}$

2. Calcula as mesmas grandezas do exercício anterior para o mês de Outubro, sabendo que: $P=77\text{m}$, $ETP=68\text{mm}$ e que $A_{\text{Setembro}}=1\text{mm}$.

$j=\text{Outubro}$

$\Delta A = ?$

$L = ?$

$S = ?$

3. Calcula L e ΔA para o mês de Maio, sabendo que: $P=37\text{mm}$, $ETP=76\text{mm}$ e que A no mês anterior era o valor máximo para aquele tipo de solo. Calcula também ETR e D .

$j=\text{Maio}$

Classificação climática método de Thornthwaite

$$MI=28.7-40.2=-11.5\%$$



C_1 seco sub-húmido (**quadro 11.4**)

$$ETP_{\text{anual}}=799\text{mm}$$



B'_2 Mesotérmico (**quadro 11.5**)

$$HI=229/799 = 28.7\%$$

$$AI=321/799 = 40.2\%$$



s_2 (**quadro 11.6**)

Mas debes olhar
também para P-ETP
mensal!!!

$$CEET = 42.7\%$$



a' (**quadro 11.7**)



ISA

2ª Parte - Fluxos

2024-2025

CLIMATOLOGIA E AGROMETEOROLOGIA

U LISBOA

UNIVERSIDADE
DE LISBOA



INSTITUTO
SUPERIOR DE
AGRONOMIA

Exercício 1: Número de Reynolds e Convecção Forçada

Considere uma placa horizontal de comprimento 0,5 m e largura 0,3 m exposta ao vento com uma velocidade de 2 m/s. A temperatura da placa é de 35°C e a temperatura do ar é de 25°C. A viscosidade cinemática do ar é $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

- a) Determine o número de Reynolds para a placa.
- b) Classifique o tipo de fluxo (laminar ou turbulento) de acordo com o valor de Reynolds.
- c) Estime o número de Nusselt e calcule a resistência ao transporte de calor sensível.

Exercício 1: Número de Reynolds e Convecção Forçada

Considere uma **placa horizontal** de comprimento 0,5 m e largura 0,3 m exposta ao vento com uma velocidade de 2 m/s. A temperatura da placa é de 35°C e a temperatura do ar é de 25°C. A viscosidade cinemática do ar é $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Dados:

- Comprimento da placa (d): 0,5 m
- Largura da placa: 0,3 m
- Velocidade do vento (v): 2 m/s
- Viscosidade cinemática (DM): $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

$$a) \quad Re = \frac{v \cdot d}{DM} = \frac{2 \cdot 0,5}{1,5 \times 10^{-5}} = 6,6 \times 10^4$$

$$b) \quad Re > 2 \times 10^4, \text{ Fluxo turbulento}$$

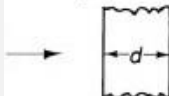
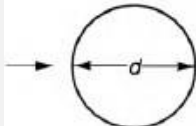
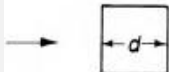
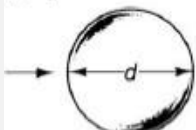
$$c) \quad Nu = 0,032 Re^{0,8} = 230$$

$$r_H = \frac{d}{Nu D_H} =$$

$$DH \text{ do ar} \sim 2,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Table A.5 Nusselt Numbers for Air

(a) Forced Convection

Shape	Case	Range of Re	Nu			
(1) Flat plates						
	Streamline flow	$< 2 \times 10^4$	$0.60 \text{ Re}^{0.5}$			
	Turbulent flow	$> 2 \times 10^4$	$0.032 \text{ Re}^{0.8}$			
	(2) Cylinders					
				Narrow range of Reynolds numbers	1 – 4	$0.89 \text{ Re}^{0.33}$
					4 – 40	$0.82 \text{ Re}^{0.39}$
		$40 - 4 \times 10^3$	$0.62 \text{ Re}^{0.47}$			
		$4 \times 10^3 - 4 \times 10^4$	$0.17 \text{ Re}^{0.62}$			
		$4 \times 10^4 - 4 \times 10^5$	$0.024 \text{ Re}^{0.81}$			
	Wide range of Reynolds numbers	or				
		$10^{-1} - 10^3$	$0.32 + 0.51 \text{ Re}^{0.52}$			
		$10^3 - 5 \times 10^4$	$0.24 \text{ Re}^{0.60}$			
(3) Spheres						
		0 – 300	$2 + 0.54 \text{ Re}^{0.5}$			
		$50 - 1.5 \times 10^5$	$0.34 \text{ Re}^{0.6}$			

Exercício 2: Convecção Livre

Uma folha está disposta verticalmente ao vento, com um comprimento de 0,2 m e uma largura de 0,1 m. A temperatura da superfície da folha é de 28°C, e a temperatura do ar é de 24°C. A aceleração da gravidade é 9,8 m/s², e o coeficiente de expansão térmica do ar é $3,66 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

- a) Calcule o número de Grashof para o sistema.
- b) Sabendo que a convecção é livre, determine o tipo de fluxo (laminar ou turbulento) .
- c) Calcule o número de Nusselt e, em seguida, a densidade do fluxo de calor sensível (H) da folha para o ambiente.

Exercício 2: Convecção Livre

Uma **folha está disposta verticalmente** ao vento, com um comprimento de 0,2 m e uma largura de 0,1 m. A temperatura da superfície da folha é de 28°C, e a temperatura do ar é de 24°C. A aceleração da gravidade é 9,8 m/s², e o coeficiente de expansão térmica do ar é 3,66×10⁻³°C.

Número de Grashof (Gr)	$Gr = \frac{a g d^3 (T_s - T_a)}{D_M^2}$ $= 1.58 \times 10^8 d^3 (T_s - T_a)$ Eq. 8.13	a = coeficiente de expansão térmica do fluido (1/273 para o ar) g = aceleração da gravidade (9.8 m s⁻²) T_s = temperatura da superfície T_a = temperatura do fluido
--------------------------------------	--	--

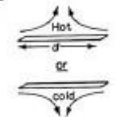
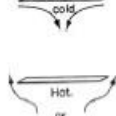
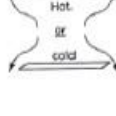
$$Gr = 1,58 \times 10^8 \times 0,2^3 \times (28 - 24) \sim 5,1 \times 10^6$$

O fluxo é laminar

$$NU = 0.58 \times Gr^{0,25} = 27.5$$

$$H \approx 12,61 \text{ W/m}^2$$

(b) Free Convection

Shape and relative temperature	Range		Nu
	Laminar flow	Turbulent flow	
(1) Horizontal flat plates or cylinders			
(i) 	$Gr < 10^5$		$0.50 Gr^{0.25}$
(ii) 		$Gr > 10^5$	$0.13 Gr^{0.33}$
(iii) 	$10^4 < Gr < 10^9$	Arrangement not conducive to turbulence	$0.23 Gr^{0.25}$
(iv) 			$0.09 Gr^{0.33}$
(2) Vertical flat plates or cylinders	$10^4 < Gr < 10^9$	$10^9 < Gr < 10^{12}$	$0.58 Gr^{0.25}$
			$0.11 Gr^{0.33}$
(3) Spheres	$Gr^{0.25} < 220$		$2 + 0.54 Gr^{0.25}$

Exercício 3: Calor sensível

Uma folha aproximadamente circular com diâmetro igual a 5 cm mantém uma temperatura de 30°C. Determine a densidade do fluxo de calor sensível:

- a) quando a folha está imersa em ar com velocidade de 5 m s⁻¹ e à temperatura de 25°C; e
- b) quando a velocidade do ar é 0.02 m s⁻¹ e a temperatura do ar é de 20°C.

As propriedades do ar são calculadas à temp. média da superfície e do ar

Calor sensível

$$H = \rho c_p \frac{T_s - T_a}{r_H} \quad \text{Eq. 8.8}$$

T_s, T_a = temperaturas junto à superfície e no fluido
 r_H = resistência à transferência de calor sensível [s m⁻¹]

$$r_H = \frac{d}{\text{Nu } D_H}$$

- a) Convecção forçada, $H = 200,67 \text{ Wm}^{-2}$
- b) Convecção livre, $H = 37,97 \text{ Wm}^{-2}$

Nu(numero de Nusselt) depende de:
-1. convecção livre ou forçada (Gr/Re₂)
-2. forma
-3. fluxo laminar ou turbulento (Re)

Exercício 4: Calor sensível

Um animal glabro seco encontra-se em campo aberto, sendo a temperatura do ar 10°C e velocidade média horizontal do vento de 5 m s⁻¹. A temperatura da pele do animal era 26°C. Supondo que a forma do animal pode ser aproximada por um cilindro de 0.5 m de comprimento e 0.15 m de diâmetro. Calcule a perda de calor sensível pela pele do animal. Considere que o animal está perpendicular ao vento.

As propriedades do ar são calculadas à temp. média da superfície e do ar

Calor sensível

$$H = \rho c_p \frac{T_s - T_a}{r_H}$$

Eq. 8.8

T_s, T_a = temperaturas junto à superfície e no fluido

r_H = resistência à transferência de calor sensível [s m⁻¹]

$$\rho = 1.208 \text{ kg m}^{-3} \text{ (T } \sim 18^\circ\text{C)}$$

$$c_p = 1.01 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ calor específico a pressão constante}$$

$$H = 426 \text{ W m}^{-2}$$

Nu(numero de Nusselt) depende de:

- 1. convecção livre ou forçada (Gr/Re₂)
- 2. forma
- 3. fluxo laminar ou turbulento (Re)

Exercício 5: Balanço

Num dia de céu limpo, as medições meteorológicas realizadas sobre uma superfície relvada, cujo albedo é de 25%, foram as seguintes:

- Radiação Global ($S_{\downarrow}$) = 800 W m^{-2}
- Temperatura do ar (T_a) = 25°C
- Temperatura da superfície relvada (T_s) = 29°C
- Fluxo de calor para o solo (G) = 50 W m^{-2}
- Calor sensível da superfície relvada para a atmosfera (H) = 100 W m^{-2}

Considerando que a superfície relvada se comporta como um corpo negro, determine a quantidade de água que dela se evapora por unidade de área e de tempo.

$$E = 0,1353 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Exercício 6.

Em determinado momento, a temperatura (t_s) de uma folha exposta à radiação solar é de 31 °C. A folha está a transpirar para uma atmosfera à temperatura (t_a) de 28 °C e humidade relativa (HR) de 75 %. A resistência da camada-limite é de 50 s m⁻¹ e a resistência dos estomas é de 180 s m⁻¹. Determine:

- a) a quantidade de água evapotranspirada pela folha, por unidade de área e por unidade de tempo;
- b) as trocas de calor sensível entre a folha e o meio ambiente;
- c) a quantidade de radiação líquida recebida pela folha.

(Considere que todas as trocas de energia entre a folha e o meio ambiente, excepto na forma de calor sensível e calor latente, são desprezáveis)

Soluções: a) $E=0,051 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; b) $H= 65,6 \text{ W m}^{-2}$; c) $R_n= 189,53 \text{ W m}^2$ 14

Exercício 7. Num jogo de futebol Sporting-Benfica, foram feitas uma série de medições no campo relvado do estádio de forma a estimar a irrigação a aplicar no dia anterior ao do referido jogo. As medições forneceram os seguintes resultados:

- Irradiância solar global ($S_{\downarrow}$) = 900 W m^{-2}**
- Albedo da relva = 25%**
- Radiação de grande comprimento de onda proveniente da atmosfera (L) = 340 W m^{-2}**
- Temperatura da superfície relvada (T_s) = 26°C**
- Fluxo de calor para o solo (G) = 70 W m^{-2}**
- Calor sensível da superfície relvada para a atmosfera (H) = 150 W m^{-2}**

Considerando que a superfície relvada se comporta como um corpo negro para a radiação de grande comprimento de onda, e que $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ e $\lambda = 2450 \text{ J g}^{-1}$, determine a quantidade de água evaporada do campo relvado, por unidade de área e de tempo;

Soluções: $E = 0,14 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Exercício 8. Um feijoeiro encontra-se envolvido em ar à temperatura de 25°C e humidade relativa de 25%. A resistência dos estomas da página superior da folha de feijoeiro é de 242.2 s m⁻¹, enquanto na página inferior é de 37.8 s m⁻¹. Considerando a temperatura da folha a 25°C e as resistências da camada limite de cada superfície iguais a 50 s m⁻¹, calcule:

- a) a resistência da folha para a transferência de vapor de água;
- b) a taxa de transpiração da folha.

Vapor de água

$$E = \frac{\chi_s - \chi_a}{r_v}$$

Eq. 8.10

χ_s, χ_a = humidade absoluta junto à superfície e no ar [kg m⁻³]
 r_v = resistência à transferência de vapor de água [s m⁻¹]

a) $r_v = 67,57 \text{ s m}^{-1}$

b) $E = 0.255 \text{ gm}^{-2}\text{s}^{-1}$

$$\begin{aligned} \text{a) } r_v &= 67,57 \text{ s m}^{-1} \\ \text{b) } E &= 0.255 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

Exercício 8. Um feijoeiro encontra-se envolvido em ar à temperatura de 25°C e humidade relativa de 25%. A resistência dos estomas da página superior da folha de feijoeiro é de 242.2 s m⁻¹, enquanto na página inferior é de 37.8 s m⁻¹. Considerando a temperatura da folha a 25°C e as resistências da camada limite de cada superfície iguais a 50 s m⁻¹, calcule:

- a) a resistência da folha para a transferência de vapor de água;
- b) a taxa de transpiração da folha.

Para calcular a resistência da folha para a transferência de vapor de água, devemos considerar as resistências das duas superfícies (página superior e inferior) em paralelo, além das resistências da camada-limite.

1. Resistência Total da Página Superior : $r_{total_upper} = r_{stomata_upper} + r_{bl} = 242,2 + 50 = 292,2 \text{ s/m}$

2. Resistência Total da Página Inferior: $r_{total_lower} = r_{stomata_lower} + r_{bl} = 37,8 + 50 = 87,8 \text{ s/m}$

3. Resistência Equivalente da Folha: Como as duas resistências estão em paralelo, a resistência total é dada por:

$$r_{leaf} = \frac{r_{total_upper} \cdot r_{total_lower}}{r_{total_upper} + r_{total_lower}}$$

a) $r_v = 67,57 \text{ s m}^{-1}$
b) $E = 0.255 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Exercício 8. Um feijoeiro encontra-se envolvido em ar à temperatura de 25°C e humidade relativa de 25%. A resistência dos estomas da página superior da folha de feijoeiro é de 242.2 s m⁻¹, enquanto na página inferior é de 37.8 s m⁻¹. Considerando a temperatura da folha a 25°C e as resistências da camada limite de cada superfície iguais a 50 s m⁻¹, calcule:

- a) a resistência da folha para a transferência de vapor de água;
- b) a taxa de transpiração da folha.

Vapor de água

$$E = \frac{\chi_s - \chi_a}{r_v}$$

Eq. 8.10

χ_s, χ_a = humidade absoluta junto à superfície e no ar [kg m⁻³]
 r_v = resistência à transferência de vapor de água [s m⁻¹]

9. A temperatura de uma folha exposta à radiação solar é, em determinado momento, 28 °C. A folha está a transpirar para uma atmosfera à temperatura de 26 °C e humidade relativa de 30%. A resistência à transferência de vapor de água da camada limite da folha é 40 s m⁻¹ e as resistências estomáticas são 250 s m⁻¹ e 100 s m⁻¹, respetivamente para a página superior e inferior. Determine:

- a) A taxa de transpiração da folha por unidade de área e por unidade de tempo.
- b) As trocas de calor sensível entre a folha e o meio ambiente (em W m⁻²). Admita que o regime é turbulento.

$$E=0,21 \text{ gm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

O **numero de Lewis** permite estabelecer uma relação entre transferências convectiva simultâneas de **massa** e de **energia**. Sempre que a transferência de calor é dominada por convecção forçada, $m = 1/3$; em convecção livre $m = 1/4$ em regime laminar e $m = 1/3$ em regime turbulento.

$$DH=2.24 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

$$DV=2.52 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

$$\rho=1.17 \text{ (27°C) kgm}^{-3}$$

$$H=54,60 \text{ Wm}^{-2}$$

Exercício 10: Perfil logaritmo do vento

Foram determinadas velocidades do vento a várias alturas, em condições de neutralidade térmica, acima duma cultura de cevada com aproximadamente 0.5 m de altura.

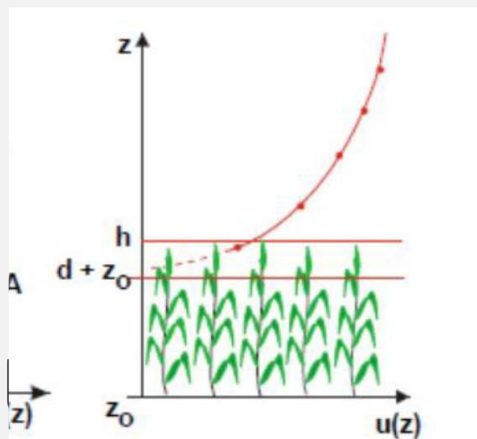
a) O quadro seguinte mostra as alturas de medição e as velocidades médias:

z (m)	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5	2
u (ms⁻¹)	1.59	1.81	1.97	2.09	2.21	2.57	2.79

Considerando o deslocamento do plano de referência (d) igual a 0.362 m,

a) Calcule a velocidade de atrito (u_*) e o parâmetro de rugosidade para o momento (z_M).

b) Calcule a velocidade do vento às alturas $z = 3$ m e $z = 10$ m.



$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln[(z - d)/z_M] = \frac{u_*}{k} \ln(z - d) - \frac{u_*}{k} \ln(z_M)$$

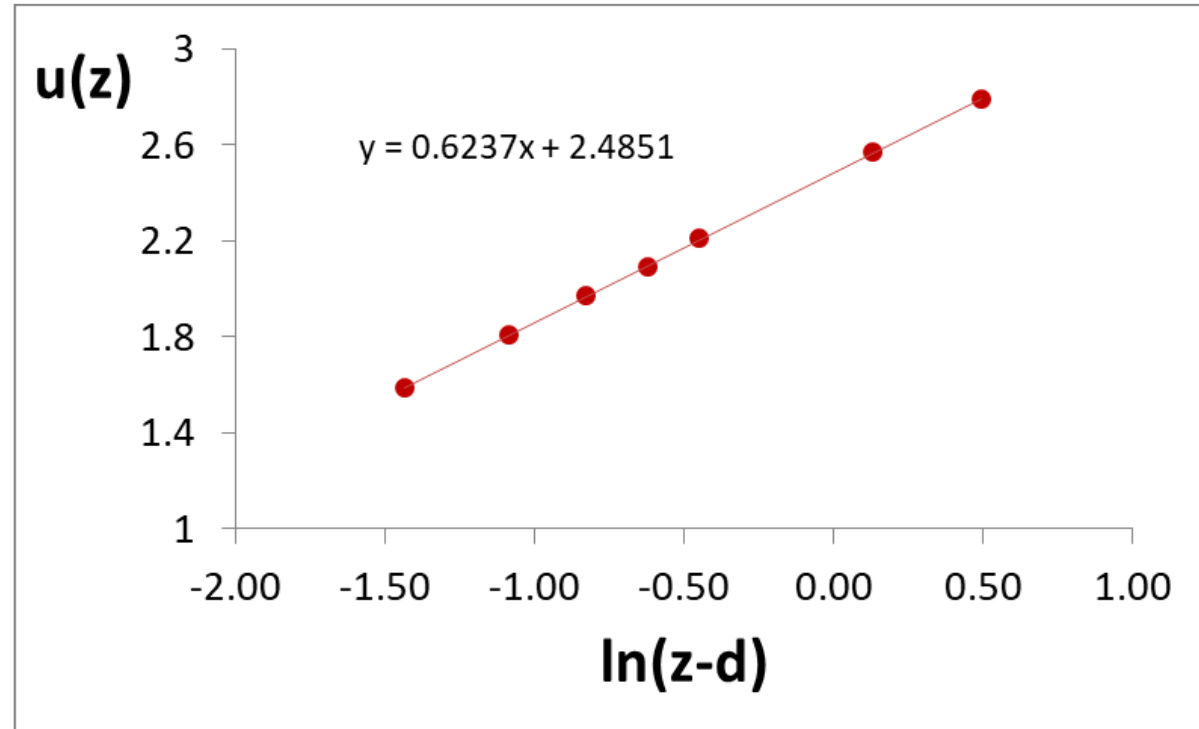
$u(z)$	velocidade do vento à altura z [m/s]
u_*	velocidade de atrito (ou fricção) [m/s]
k	constante de von Kármán (≈ 0.41)
d	deslocamento do plano zero [m]
z_M	parâmetro de rugosidade para o momento [m]

z (m)	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5	2
u (ms⁻¹)	1.59	1.81	1.97	2.09	2.21	2.57	2.79

ln(z-d)	-1.44	-1.08	-0.83	-0.62	-0.45	0.13	0.49
----------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	-------------	-------------

$h=0,5\text{m}$
 $d=0,362$
 a) $u^*=?$
 $z_M=?$
 b) $u(3\text{m})=?$
 $u(10\text{m})=?$

a) $u^* = 0,256 \text{ ms}^{-1}$
 $z_M = 0,019$
 b) $u(3\text{m}) = 3,09 \text{ ms}^{-1}$
 $u(10\text{m}) = 3,90 \text{ ms}^{-1}$



Exercício 11: Perfil logaritmo do vento

Em condições de estabilidade neutra, mediram-se a velocidade do vento, u , a concentração de vapor de água, χ , e de dióxido de carbono, ρ_c , simultaneamente a várias alturas (z), sobre um coberto de eucalipto plano e extenso. A altura média das árvores (h) era de 20 metros e a temperatura do ar na última altura de medição foi 25 °C. O deslocamento do plano de referência, d é de 12.2 m. As médias de 30 minutos das variáveis medidas em função da altura foram as seguintes:

$z(m)$	22	24	28	36	52	70
$u(z) (m\ s^{-1})$	1.181	1.337	1.583	1.934	2.365	2.683
$\chi(z) (g\ m^{-3})$	13.23	13.00	12.62	12.00	11.45	10.96
$\rho_c(z) (g\ m^{-3})$	0.713	0.717	0.720	0.724	0.728	0.734

- Calcule a velocidade de atrito (u_*), e o parâmetro de rugosidade para o momento (z_M).
- Calcule o fluxo de momento (= tensão de cisalhamento), τ .
- Calcule a resistência aerodinâmica à transferência de momento (r_{aM}) entre a altura de 52 m e o nível em que a velocidade extrapolada é nula (i. e., $z = d + z_M$).
- Calcule a assimilação de dióxido de carbono (fluxo de CO_2) para a cultura.
- Calcule a transpiração (fluxo de vapor de água) da cultura para o ar.

$h = 20\text{m}$

$T_a = 25^\circ\text{C}$

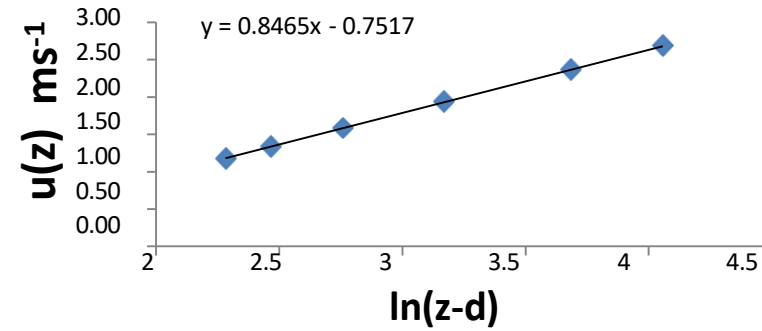
$d = 12.2\text{ m}$

a) $u_* = ?$ $z_M = ?$

b) $\tau = ?$

c) $r_{AM} = ?$

$\rho (25^\circ\text{C}) \sim 1,17\text{ kgm}^{-3}$



$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln[(z-d)/z_M] = \frac{u_*}{k} \ln(z-d) - \frac{u_*}{k} \ln(z_M)$$

$$u_* = mk \text{ [ms}^{-1}\text{]}$$

$$\tau = \rho (u_*)^2 \text{ [Nm}^{-2}\text{]}$$

$$r_{AM} = u(z)/(u_*)^2 \text{ [sm}^{-1}\text{]}$$

$$u_* = 0.347 \text{ ms}^{-1}$$

$$z_M = 2.43$$

$$\tau = 0.14 \text{ Nm}^{-2}$$

$$r_{AM} = 19,64 \text{ sm}^{-1}$$

- d) Calcule a assimilação de dióxido de carbono (fluxo de CO_2) para a cultura.
e) Calcule a transpiração (fluxo de vapor de água) da cultura para o ar.

$$F_j = -\frac{d\rho_j}{du} u_*^2$$

Fluxo de massa sobre superfícies extensas e uniformes

d) $\text{FCO}_2 = ?$

e) $\text{FH}_2\text{O} = ?$

$$\begin{aligned}\text{FCO}_2 &= -0.00154 \text{ gm}^{-2} \text{ s}^{-1} \\ \text{FH}_2\text{O} &= 0.182 \text{ gm}^{-2} \text{ s}^{-1}\end{aligned}$$

Exercício 12: Razão de Bowen

Fizeram-se medições micrometeorológicas sobre uma cultura de trigo cujas plantas têm aproximadamente 0.7 m de altura. Assim, fizeram-se as médias de 30 minutos das seguintes grandezas:

$$R_n = 600 \text{ W m}^{-2}; G = 35 \text{ W m}^{-2}$$

Altura (m)	0.8	2.0
Temperatura (°C)	30	28
Vapor de água (Pa)	2100	2000

Calcule a razão de Bowen e os fluxos de calor sensível e de calor latente.

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{dT}{de}$$

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

$$\beta = 1,358$$

$$\lambda E = 239,6 \text{ W m}^{-2}$$

$$H = 325,39 \text{ W m}^{-2}$$

Exercício 13: Número de Lewis

A temperatura de uma folha exposta à radiação solar é, em determinado momento, 28 °C. A folha está a transpirar para uma atmosfera à temperatura de 26 °C e humidade relativa de 30%. A resistência à transferência de vapor de água da camada limite da folha é 40 s m⁻¹ e as resistências estomáticas são 250 s m⁻¹ e 100 s m⁻¹, respetivamente para a página superior e inferior. Determine:

- A taxa de transpiração da folha por unidade de área e por unidade de tempo.
- As trocas de calor sensível entre a folha e o meio ambiente (em W m⁻²). Admita que o regime é turbulento.

$$T_f = 28^\circ\text{C}$$

$$T_a = 26^\circ\text{C}$$

$$\text{HR} = 30\%$$

$$r_{va} = 40 \text{ s m}^{-1}$$

$$r_{s_sup} = 250 \text{ s m}^{-1}$$

$$r_{s_inf} = 100 \text{ s m}^{-1}$$

$$\text{a) } E = ?$$

$$r_v = r_s + r_{va}$$

r_s : resistências estomática (r_s)

r_{va} : resistências da camada limite (r_{va})

$$E = 0,21 \text{ gm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

b) $H = ?$

Calor sensível	$H = \rho c_p \frac{T_s - T_a}{r_H}$ Eq. 8.8	T_s, T_a = temperaturas junto à superfície e no fluido r_H = resistência à transferência de calor sensível [$s \cdot m^{-1}$]
----------------	--	--

$$r_H = \frac{r_{va}}{Le^{(1-m)}}$$

Número de
Lewis (Le)

$$Le = \frac{D_H}{D_j} \quad \text{Eq. 8.17}$$

O **numero de Lewis** permite estabelecer uma relação entre transferências convectiva simultâneas de **massa** e de **energia**.

A relação entre r_{va} e r_H depende do tipo de regime.

Sempre que a transferência de calor é dominada por convecção forçada, $m = 1/3$; em convecção livre $m = 1/4$ em regime laminar e $m = 1/3$ em regime turbulento.

$$D_H = 2.24 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$$

$$D_V = 2.52 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$$

$$\rho = 1.17 \text{ (27°C) kgm}^{-3}$$

$$H = 54,60 \text{ Wm}^{-2}$$