Equivalenze tra i sistemi C.G.S. e SI:

1 mbar = 0.1 kPa

$1\ cal \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1} = 0.041868\ MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$

$1\ MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1} = 23.884\ cal \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1} = 0.408\ mm \cdot d^{-1}$

$1\ mm = 58.6\ cal \cdot cm^{-2} = 2.45\ MJ \cdot m^{-2}$

METODO PENMAN-MONTEITH (FAO, 1998)

$$ETP_0 = \frac{0{,}408\,\Delta\,(Rn - G) + \gamma\,(900 / T_k)\,U_2\,(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0{,}34\,U_2)}$$

Δ	Inclinazione della curva della pressione di vapore (kPa °C^{-1})
Rn	Radiazione netta (MJ m^{-2} d^{-1})
G	Flusso di calore dal suolo (MJ m^{-2} d^{-1})
γ	Costante psicrometrica (kPa °C^{-1})
T_k	Temperatura media assoluta (°C + 273)
U_2	Velocità del vento a 2 m dal suolo (m s^{-1})
(ea - ed)	Deficit di pressione di vapore (kPa)

Inclinazione della curva della pressione di vapore (kPa °C^{-1})

$$ETP_0 = \frac{0{,}408\,\Delta\,(Rn - G) + \gamma\,(900 / T_k)\,U_2\,(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0{,}34\,U_2)}$$

Inclinazione della curva di pressione di vapore (Δ) in funzione della temperatura

T. °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Δ	0,044	0,047	0,051	0,054	0,057	0,061	0,065	0,069	0,073	0,078
T. °C	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Δ	0,082	0,087	0,093	0,098	0,104	0,110	0,116	0,123	0,130	0,137
T. °C	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Δ	0,145	0,153	0,161	0,170	0,179	0,189	0,199	0,209	0,220	0,232
T. °C	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Δ	0,243	0,256	0,269	0,282	0,296	0,311	0,326	0,342	0,358	0,375

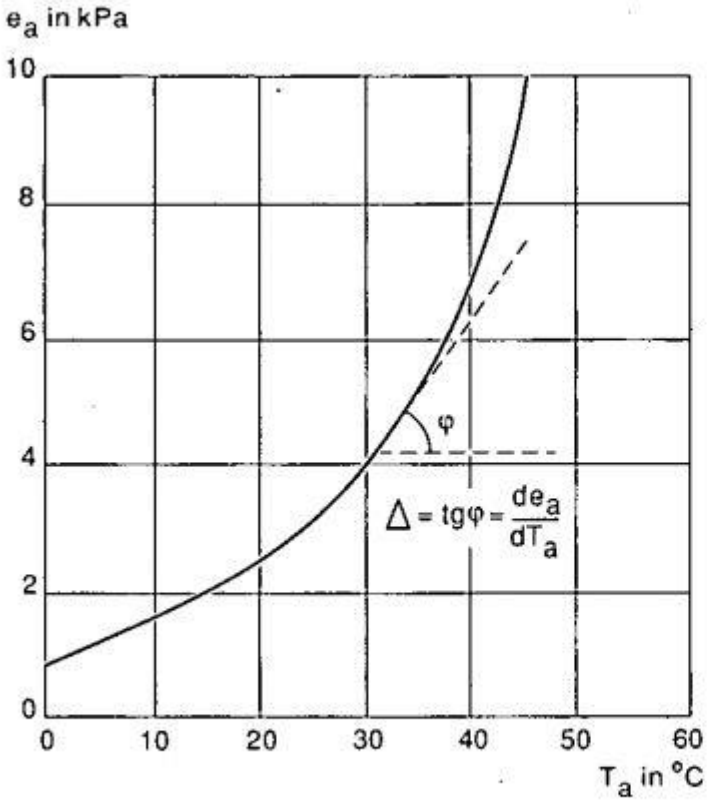
$$= \frac{4098\,e_a}{(T + 237{,}3)^2}$$

e_a = pressione di saturazione del vapore alla temperatura T … ?

Inclinazione della curva della pressione di vapore (kPa °C^{-1})

$$ET_0 = \frac{0{,}408\,\Delta\,(Rn - G) + \gamma\,(900 / T_k)\,U_2\,(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0{,}34\,U_2)}$$

Inclinazione della curva di pressione di vapore (Δ) in funzione della temperatura



$$= \frac{4098\,e_a}{(t_{mean} + 237{,}3)^2}$$

Figure 5.5 Saturated water vapour pressure e_a as a function of air temperature T_a.

UMIDITA' ATMOSFERICA

Umidità assoluta (u.a.)

Peso, espresso in grammi, di vapore contenuto nell'unità di volume d'aria (g m^{-3})

Contenuto massimo di vapor d'acqua m^{-3} al variare della temperatura

a 30 °C u.a. max o saturazione	→	*30,4 g m^{-3}*
a 10 °C " " "	→	*9,4 g m^{-3}*
a -10 °C " " "	→	*2,2 g m^{-3}*

Umidità relativa (R.H.)

Rapporto % tra il contenuto di vapore dell'atmosfera e la quantità massima che potrebbe contenere ad una determinata temperatura

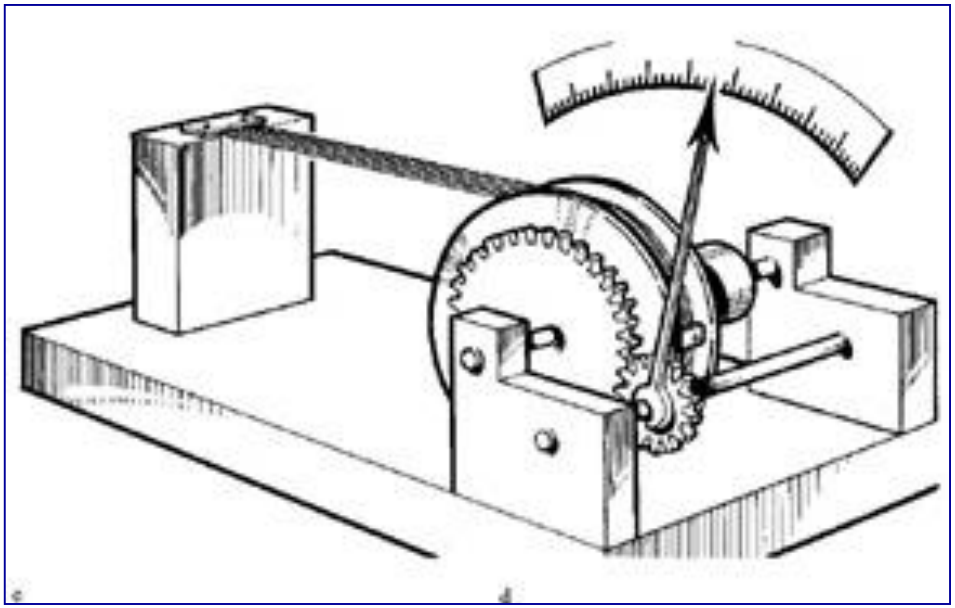
Es.

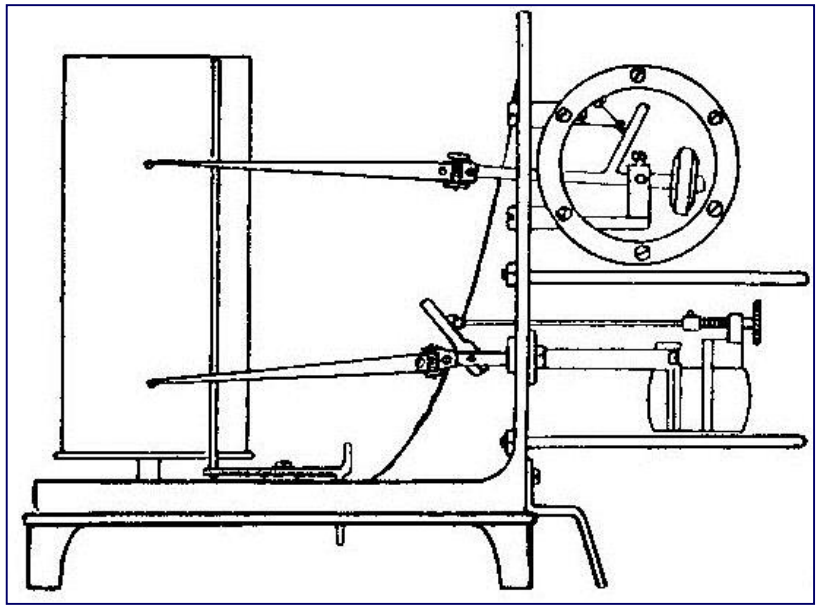
Temperatura = *30 °C*

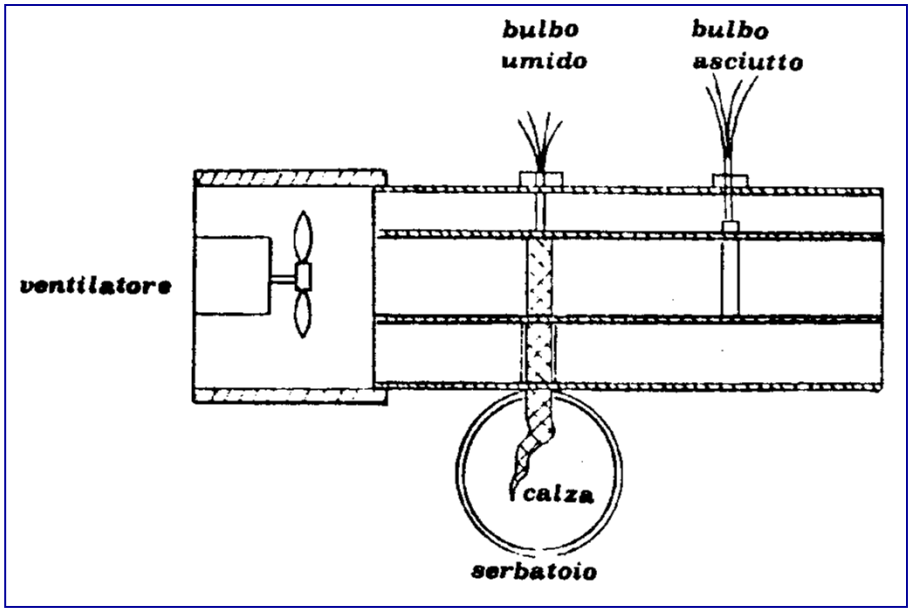
Umidità reale = *24 g m^{-3}*

$$\frac{24 \text{ g m}^{-3}}{30{,}4 \text{ g m}^{-3}} \times 100 = 79\%$$

Strumenti per la misura dell'umidità atmosferica





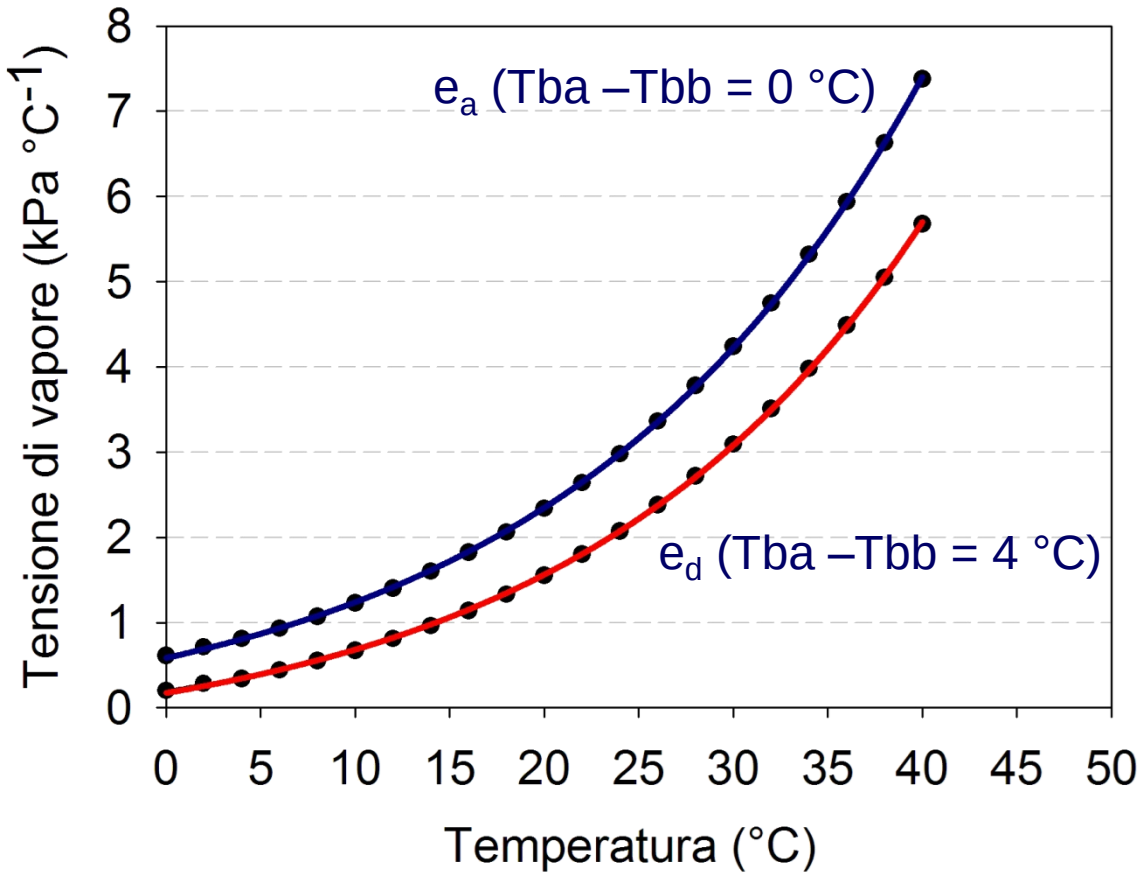


Relazione tra pressione di vapore e temperatura

Pressione di vapore (kPa °C^{-1}) da dati di temperatura dei termometri a bulbo asciutto e bagnato dello psicrometro ventilato

Temperatura del bulbo asciutto (°C)	Depressione del bulbo bagnato (°C) (Alt 0 – 1000 m)											
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
40	7,38	6,49	5,68	4,92	4,22	3,58	2,98	2,43	1,92	1,44	1,01	0,6
38	6,63	5,81	5,05	4,36	3,71	3,11	2,56	2,05	1,58	1,14	0,73	
36	5,94	5,19	4,49	3,84	3,25	2,69	2,18	1,71	1,27	0,86	0,49	
34	5,32	4,62	3,98	3,38	2,83	2,32	1,84	1,40	1,00	0,62		
32	4,75	4,11	3,51	2,96	2,45	1,98	1,54	1,13	0,75	0,40		
30	4,24	3,65	3,09	2,58	2,11	1,67	1,26	0,88	0,53			
28	3,78	3,23	2,72	2,24	1,80	1,40	1,02	0,67	0,34			
26	3,36	2,85	2,38	1,94	1,53	1,15	0,80	0,47	0,16			
24	2,98	2,51	2,07	1,66	1,28	0,93	0,60	0,29				
22	2,64	2,20	1,80	1,42	1,06	0,74	0,43	0,14				
20	2,34	1,93	1,55	1,20	0,87	0,56	0,27					
18	2,06	1,68	1,33	1,00	0,69	0,41	0,14					
16	1,82	1,46	1,14	0,83	0,54	0,27						
14	1,60	1,27	0,96	0,67	0,40	0,15						
12	1,40	1,09	0,81	0,53	0,28							
10	1,23	0,94	0,67	0,41	0,17							
8	1,07	0,80	0,55	0,31	0,08							
6	0,93	0,68	0,44	0,21								
4	0,81	0,57	0,34	0,16								
2	0,71	0,48	0,28	0,08								
0	0,61	0,40	0,20									

Relazione tra pressione di vapore e temperatura

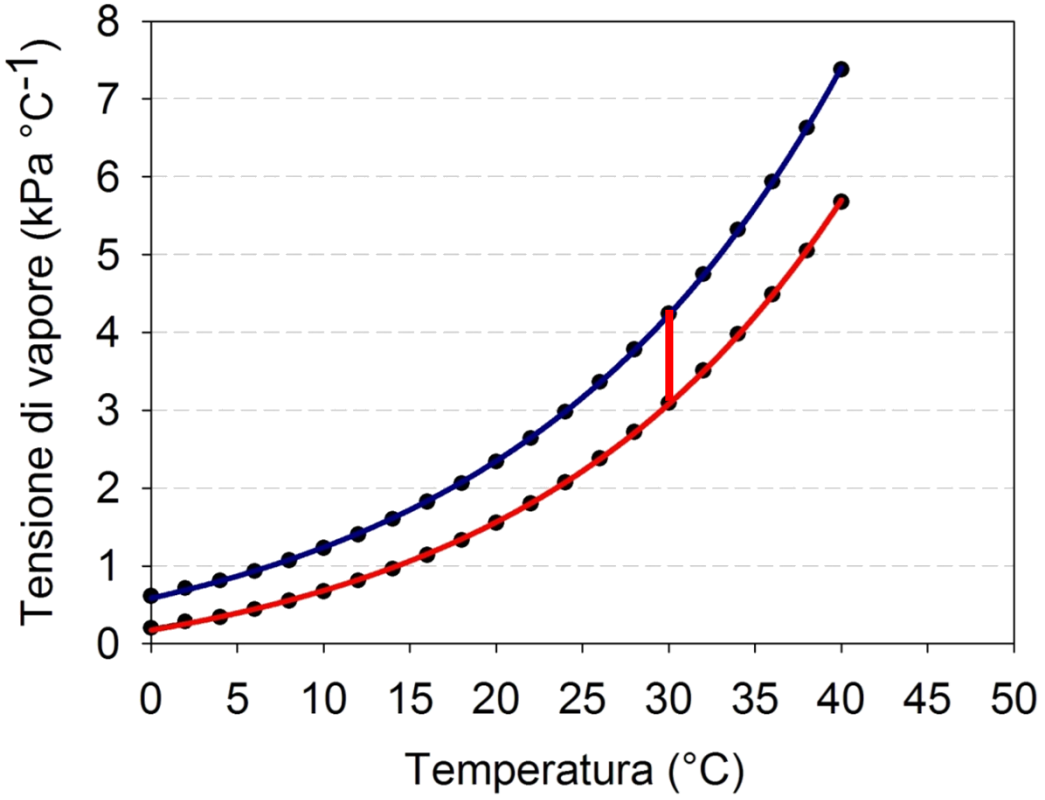


$$e_a = 0{,}6108 \cdot \exp\left[(17{,}27\,T) / (T + 237{,}3) \right]$$

Deficit di pressione di vapore (VPD)

Conoscendo l'umidità relativa dell'aria (RH %) con una semplice proporzione si può risalire alla pressione di vapore effettiva (e_d)

$$e_d : RH = e_a : 100 \qquad e_d = e_a \cdot RH / 100$$



(ea - ed) prende il nome di **deficit di pressione di vapore** (kPa).
Incrementi di questo deficit determinano incrementi di evapotraspirazione

Radiazione netta e radiazione infrarossa ad onda corta

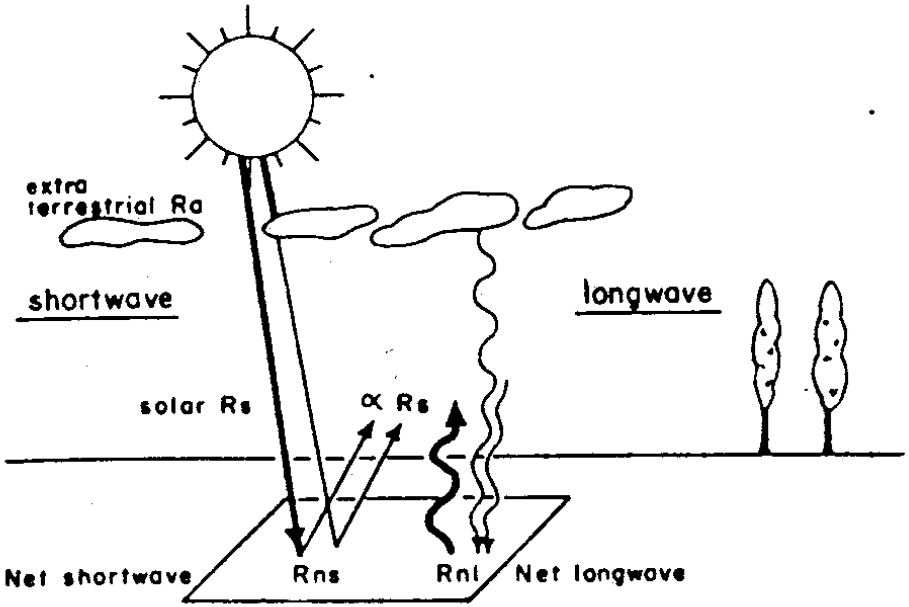
$$ETP_0 = \frac{0{,}408\,\Delta\,(Rn - G) + \gamma\,(900 / T_k)\,U_2\,(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0{,}34\,U_2)}$$

Rn = Rns - Rnl

Rns = (1 – α) Rs

Rs = radiazione solare (MJ m^{-2} d^{-1})

α= albedo



Net radiation Rn = net solar radiation Rns – net longwave radiation Rnl
= (1-α) Rs - Rnl

TABLE 4.2.2 Plausible Values for Daily Mean Short-Wave Solar Radiation Reflection Coefficient (Albedo) for Broad Land Cover Classes

Land cover class	Short-wave radiation reflection coefficient α
Open water	0.08
Tall forest	0.11–0.16
Tall farm crops (e.g., sugarcane)	0.15–0.20
Cereal crops (e.g., wheat)	0.20–0.26
Short farm crops (e.g., sugar beet)	0.20–0.26
Grass and pasture	0.20–0.26
Bare soil	0.10 (wet)–0.35 (dry)
Snow and ice	0.20 (old)–0.80 (new)

Note: Albedo can vary widely with time of day, season, latitude, and cloud cover.

In the absence of knowledge on crop cover the value $\alpha = 0.23$ is recommended.

Radiazione netta e radiazione infrarossa ad onda corta

In mancanza del dato della Radiazione solare (Rs)

$$Rs = (0,25 + 0,50 \cdot n/N) \cdot Ra$$

n/N = eliofania relativa

n = ore

N = ore

Ra = Radiazione astronomica (MJ m^{-2} d^{-1})

Radiazione netta e radiazione infrarossa ad onda corta

Radiazione astronomica (**Ra**) (MJ m^{-2} d^{-1}) al 15° giorno dei 12 mesi dell'anno alle diverse latitudini per la formula di Penman

Lat.	Northem Hemisphere											
deg.	**Jan**	**Feb**	**Mar**	**Apr**	**May**	**Jun**	**July**	**Aug**	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Dec**
50	8,9	14,4	22,2	31,5	38,5	41,7	40,2	34,4	25,7	16,9	10,2	7,5
48	10,1	15,7	23,3	32,2	38,8	41,8	40,4	34,9	26,6	18,1	11,4	8,7
46	11,3	16,9	24,3	32,9	39,1	41,9	40,6	35,4	27,5	19,2	12,6	9,9
44	12,5	18,0	25,3	33,5	39,3	41,9	40,7	35,9	28,4	20,3	13,9	11,1
42	13,8	19,2	26,3	34,1	39,5	41,9	40,8	36,3	29,2	21,4	15,1	12,4
40	15,0	20,4	27,2	34,7	39,7	41,9	40,8	36,7	30,0	22,5	16,3	13,6
38	16,2	21,5	28,1	35,2	39,9	41,8	40,8	37,0	30,7	23,6	17,5	14,8
36	17,5	22,6	29,0	35,7	40,0	41,7	40,8	37,4	31,5	24,6	18,7	16,1
34	18,7	23,7	29,9	36,1	40,0	41,6	40,8	37,6	32,1	25,6	19,9	17,3
32	19,9	24,8	30,7	36,5	40,0	41,4	40,7	37,9	32,8	26,6	21,1	18,5
30	21,1	25,8	31,4	36,8	40,0	41,2	40,6	38,0	33,4	27,6	22,2	19,8
28	22,3	26,8	32,2	37,1	40,0	40,9	40,4	38,2	33,9	28,5	23,3	21,0
26	23,4	27,8	32,8	37,4	39,9	40,6	40,2	38,3	34,5	29,3	24,5	22,2
24	24,6	28,8	33,5	37,6	39,7	40,3	39,9	38,3	34,9	30,2	25,5	23,3
22	25,7	29,7	34,1	37,8	39,5	40,0	39,6	38,4	35,4	31,0	26,6	24,5
20	26,8	30,6	34,7	37,9	39,3	39,5	39,3	38,3	35,8	31,8	27,7	25,6

Radiazione netta e radiazione infrarossa ad onda lunga

Rn = Rns - Rnl

Rnl = f (n/N) f (e_d) f (t) (MJ m^{-2} d^{-1})

n/N = eliofania

n = ore

N = ore

Valori della funzione f(n/N) in corrispondenza dei diversi valori di n/N

n/N	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	030	035	*0,40*	0,45	0,50
f(n/N)	***0,10***	***0,15***	***0,19***	***0,24***	***0,28***	***0,33***	***0,37***	***0,42***	***0,46***	***0,51***	***0,55***
n/N	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	
f(n/N)	***0,60***	***0,64***	***0,69***	***0,73***	***0,78***	***0,82***	***0,87***	***0,91***	***0,96***	***1,00***	

$$f(n/N) = 0{,}1 + 0{,}9\ n/N$$

Radiazione netta e radiazione infrarossa ad onda lunga

N = ore

Insolazione massima

Durata media dell'insolazione massima (N) (h) al 15° giorno dei 12 mesi dell'anno in funzione della latitudine

Lat.	Northem Hemisphere											
deg.	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
50	8,3	9,8	11,6	13,5	15,2	16,1	15,7	14,3	12,3	10,4	8,7	7,9
48	8,6	10,0	11,6	13,4	15,0	15,8	15,5	14,1	12,3	10,6	9,0	8,2
46	8,8	10,1	11,6	13,3	14,8	15,5	15,2	14,0	12,3	10,7	9,2	8,5
44	9,1	10,3	11,6	13,2	14,6	15,3	15,0	13,8	12,3	10,7	9,4	8,7
42	9,3	10,4	11,7	13,2	14,4	15,0	14,8	13,7	12,3	10,8	9,6	9,0
40	9,5	10,5	11,7	13,1	14,2	14,8	14,6	13,6	12,2	10,9	9,7	9,2
38	9,6	10,6	11,7	13,0	14,1	14,6	14,4	13,5	12,2	11,0	9,9	9,4
36	9,8	10,7	11,7	12,9	13,9	14,4	14,2	13,4	12,2	11,1	10,1	9,6
34	10,0	10,8	11,8	12,9	13,8	14,3	14,1	13,3	12,2	11,1	10,2	9,7
32	10,1	10,9	11,8	1,3	13,6	14,1	13,9	13,2	12,2	11,2	10,3	9,9
30	10,3	11,0	11,8	12,7	13,5	13,9	13,8	13,1	12,2	11,3	10,5	10,1
28	10,4	11,0	11,8	12,7	13,4	13,8	13,6	13,0	12,2	11,3	10,6	10,2
26	10,5	11,1	11,8	12,6	13,3	13,6	13,5	12,9	12,1	11,4	10,7	10,4
24	10,7	11,2	11,8	12,6	13,2	13,5	13,3	12,8	12,1	11,4	10,8	10,5
22	10,8	11,3	11,9	12,5	13,1	13,3	13,2	12,8	12,1	11,5	10,9	10,7
20	10,9	11,3	11,9	12,5	12,9	13,2	13,1	12,7	12,1	11,5	11,0	10,8

Radiazione netta e radiazione infrarossa ad onda lunga

$$Rn = Rns - Rnl$$

$$Rnl = f(n/N)\ f(e_d)\ f(T)\ (MJ\ m^{-2}\ d^{-1})$$

e_d = tensione di vapore effettiva

Valori della funzione f(ed) in corrispondenza dei diversi valori di pressione effettiva

ed	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2
f(ed)	***0,28***	***0,25***	***0,23***	***0,21***	***0,2***	***0,19***	***0,17***	***0,16***	***0,15***	***0,14***	***0,13***
ed	2,4	2,6	2,8	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	**4,2**	**4,4**
f(ed)	***0,12***	***0,11***	***0,1***	***0,1***	***0,09***	***0,08***	***0,07***	***0,07***	***0,06***	***0,05***	***0,05***

$$f(e_d) = 0{,}34 - 0{,}14 * \sqrt{e_d}$$

T_k = temperatura assoluta (T + 273,16)

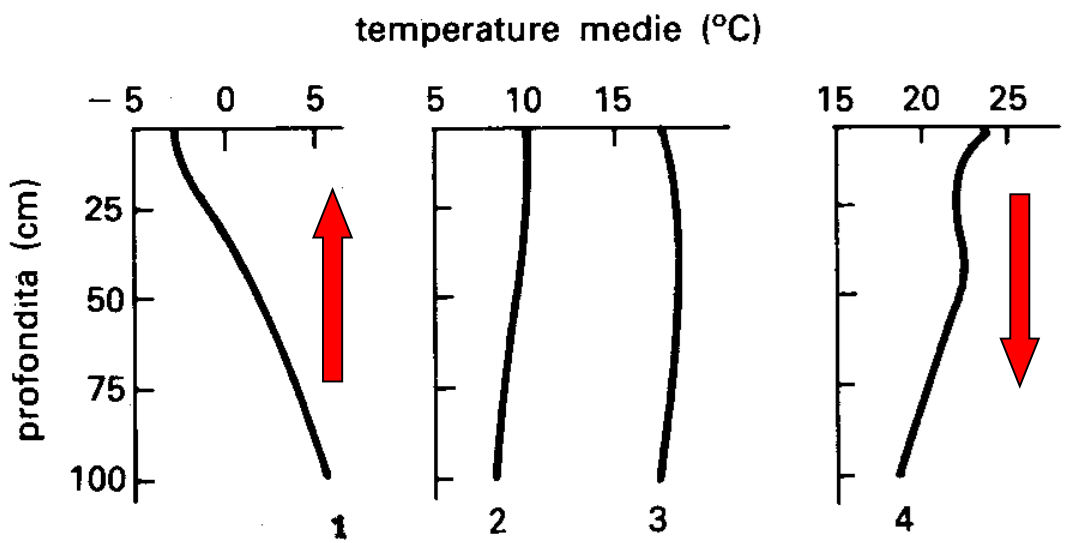
$$f(t) = \sigma \cdot (T_k)^4$$

σ = costante di Boltzmann $(4{,}903 \cdot 10^{-9})$

Flusso di calore dal suolo

$$ETP_0 = \frac{0{,}408\,\Delta\,(Rn - \boxed{G}) + \gamma\,(900 / T_k)\,U_2\,(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0{,}34\,U_2)}$$

Profili termici di un terreno inerbito: 1. Inverno. 2. Primavera. 3. Autunno. 4. Estate.



G per dati giornalieri o decadali = 0

G per dati mensili = 0,14 . ($t_{mese\ i} - t_{mese\ i-1}$)

Costante psicrometrica

$$ETP_0 = \frac{0{,}408\,\Delta\,(Rn - G) + \boxed{\gamma}\,(900 / T_k)\,U_2\,(e_a - e_d)}{\Delta + \boxed{\gamma}\,(1 + 0{,}34\,U_2)}$$

$$\gamma = 0{,}00163\,(P / \lambda)$$

P = pressione atmosferica alla quota z (kPa)

$$P = 101{,}3\,[\,(293 - 0{,}0065\,z) / 293\,]^{5{,}26}$$

λ= calore latente (MJ kg^{-1})

$$\lambda = 2{,}501 - (2{,}361 \cdot 10^{-3}) \cdot t$$

Velocità del vento

$$ETP_0 = \frac{0{,}408\,\Delta\,(Rn - G) + \gamma\,(900 / T_k)\,\boxed{U_2}\,(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0{,}34\,\boxed{U_2})}$$

Conversione della velocità del vento misurata a un'altezza diversa da 2 m

$$U_2 = \underline{U_z} \cdot \left(4{,}87 / \ln(67{,}8 \cdot \underline{z} - 5{,}42)\right)$$

$\underline{U_z}$ = velocità del vento misurata all'altezza z (m s^{-1})

$\underline{z}$ = altezza di misurazione (m)

Fattori di conversione della velocità del vento misurata a differenti altezze

$$\text{conversion factor} = \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)}$$

z height (m)	conversion factor	z height (m)	conversion factor	z height (m)	conversion factor	z height (m)	conversion factor
-	-	2.2	0.980	4.2	0.865	6.0	0.812
-	-	2.4	0.963	4.4	0.857	6.5	0.802
-	-	2.6	0.947	4.6	0.851	7.0	0.792
-	-	2.8	0.933	4.8	0.844	7.5	0.783
1.0	1.178	3.0	0.921	5.0	0.838	8.0	0.775
1.2	1.125	3.2	0.910	5.2	0.833	8.5	0.767
1.4	1.084	3.4	0.899	5.4	0.827	9.0	0.760
1.6	1.051	3.6	0.889	5.6	0.822	9.5	0.754
1.8	1.023	3.8	0.881	5.8	0.817	10.0	0.748
2.0	1.000	4.0	0.872	6.0	0.812	10.5	0.742

Conversion factors to convert wind speed measured at given height (over grass) to wind speed measured at standard height of 2 m above ground surface