

**Evapotranspiração horária
ou em intervalos de tempo menores**

Cálculo de ETo de hora em hora

Em áreas onde mudanças significativas na velocidade de vento, temperatura do ponto de orvalho ou nebulosidade acontecem durante o dia, cálculo da equação de ETo que usa espaços de tempo de hora em hora é geralmente melhor do que usando espaços de tempo de 24 h. Tais mudanças de tempo em 24 h podem causar variações no poder evaporativo do ar do ambiente durante partes do dia e podem introduzir erro nos cálculos. Porém, para a maioria das condições, aplicação da equação de Penman-Monteith FAO com dados de 24 h produz resultados precisos.

Com o advento de estações meteorológicas eletrônicas, automatizadas, são informados crescentemente dados de tempo para períodos de hora em hora ou menores. Então, em situações onde os cálculos são computadorizados, a equação de Penman-Monteith FAO pode ser aplicada em uma base de hora em hora com resultados bons. Quando utilizando a equação de Penman-Monteith FAO em uma escala de tempo de hora em hora ou menor, a equação e alguns dos procedimentos para calcular os dados meteorológicos deveriam ser ajustados para o espaço de tempo menor. A equação de Penman-Monteith FAO para espaços de tempo de hora em hora é:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^o(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (53)$$

where	ET_o	reference evapotranspiration [mm hour^{-1}],
	R_n	net radiation at the grass surface [$\text{MJ m}^{-2} \text{hour}^{-1}$] (Equation 40),
	G	soil heat flux density [$\text{MJ m}^{-2} \text{hour}^{-1}$] (Equations 45 and 46),
	T_{hr}	mean hourly air temperature [$^{\circ}\text{C}$],
	Δ	saturation slope vapour pressure curve at T_{hr} [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$] (Equation 13),
	γ	psychrometric constant [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$] (Equation 8),
	$e^o(T_{hr})$	saturation vapour pressure at air temperature T_{hr} [kPa] (Equation 11),
	e_a	average hourly actual vapour pressure [kPa] (Equation 54),
	u_2	average hourly wind speed [m s^{-1}].

para espaços de tempo de hora em hora é:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^o(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

onde

ET_o = evapotranspiração de referência [mm h^{-1}],

R_n = radiação líquida à superfície da gramínea [$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$] (Equação 40),

G = densidade do fluxo de solo calor [$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$] (Equações 45 e 46),

T_{hr} = significa temperatura do ar de hora em hora [$^{\circ}\text{C}$],

Δ = declividade da curva de pressão do vapor de saturação a T_{hr} [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$] (Equação 13),

γ = constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$] (Equação 8),

$e^o(T_{hr})$ = pressão do vapor de saturação a temperatura do ar T_{hr} [kPa] (Equação 11),

e_a = média da pressão do vapor atual de hora em hora [kPa] (Equação 54),

u_2 = cálculo da velocidade do vento média de hora em hora [m s^{-1}].

- Para períodos de hora em hora ou menores:

Para cálculos de hora em hora (ou menor), G sob uma cobertura densa de grama não correlaciona bem com temperatura do ar. G de hora em hora pode ser aproximado para períodos durante a luz do dia como:

$$G_{hr} = 0.1 R_n \quad (45)$$

e durante períodos noturno como:

$$G_{hr} = 0.5 R_n \quad (46)$$

Medida da umidade relativa, a pressão do vapor atual é determinada como:

$$e_a = e^{\circ}(T_{hr}) \frac{RH_{hr}}{100} \quad (54)$$

onde

e_a = média da pressão de vapor atual de hora em hora [kPa],

$e^{\circ}(T_{hr})$ = pressão do vapor de saturação a temperatura de ar T_{hr} [kPa] (Equação 11),

RH_{hr} = média da umidade relativa de hora em hora [%].

A radiação líquida é a diferença entre a radiação de onda curta líquida (Rns) e a radiação de onda longa líquida (Rnl) no espaço de tempo de hora em hora. Conseqüentemente:

· Se Rns e Rnl precisam ser calculados, o valor de radiação extraterrestre (Ra) para o período de hora em hora (Equação 28) deveria ser usado.

· Na estimativa de Rnl por meio de Equação 39, $(\sigma T_{\max, K^4} + \sigma T_{\min, K^4})/2$ é substituído por $\overline{\sigma T_{hr, K^4}}$ e a constante de Stefan-Boltzman se torna:

$$\sigma = (4.903/24) 10^{-9} = 2.043 10^{-10} \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}.$$

Desde que a relação R_s/R_{so} é usada para representar céu nublado, quando for calcular R_{nl} para períodos de hora em hora durante a noite, a relação que R_s/R_{so} pode ser fixado igual ao R_s/R_{so} calculado para um período de tempo que acontece 2-3 horas antes de pôr-do-sol, antes que o ângulo do sol fique pequeno. Isto geralmente servirá como uma aproximação boa de nebulosidade que acontece durante a noite subsequente. O período de hora em hora de 2 a 3 horas antes de pôr-do-sol pode ser identificado durante estimativa de R_a como o período

onde ω_s calculado pela Equação 31, está entre $(\omega_s - 0.79) \leq \omega \leq (\omega_s - 0.52)$, onde ω_s é calculado pela Equação 25. Como uma alternativa mais aproximada, o usuário pode assumir $R_s/R_{so} = 0.4$ a 0.6 durante períodos noturnos em clima úmido e sub úmido e $R_s/R_{so} = 0.7$ a 0.8 em clima árido e semi-árido. Um valor de $R_s/R_{so} = 0.3$ presume o céu totalmente nublado.

O Fluxo de calor do solo é importante para cálculos de hora em hora. Equações 45 e 46 podem ser usadas para derivar G para os períodos de hora em hora.

Os dados meteorológicos exigidos consistem de:

- temperatura do ar: temperatura média de hora em hora (T_{hr}).
- umidade relativa do ar: umidade relativa do ar média de hora em hora (RH_{hr}).
- velocidade do vento: dados de velocidade de vento média de hora em hora medidos a 2 m de altura (u_2).
- Radiação: radiação de onda curta (R_s) ou radiação líquida (R_n) de hora em hora.

Por causa da necessidade de padronização, as constantes na Equação 53 presumem uma resistência de superfície constante (r_s) de 70 s/m durante todos os períodos. Esta resistência de constante pode causar alguma subestimação de ETo de hora em hora durante alguns períodos de dia quando r_s real podem ser um pouco abaixo. A resistência constante pode causar alguma superestimação de ETo de hora em hora durante períodos quando r_s real podem ser um pouco maior. Porém, quando são somados os cálculos de ETo de hora em hora da Equação 53 para períodos de 24 horas para obter ETo equivalente de 24 h, as diferenças de hora em hora tendem a compensar um ao outro e os resultados são geralmente equivalente aos cálculos de ETo feitos em um dia (24 h). Estimativas precisas de ETo para períodos de hora em hora específicos podem requerer o uso de função de estabilidade aerodinâmica e funções por modificar o valor de r_s baseado em níveis de radiação, umidade e temperatura. Aplicação destas funções normalmente não é requerida quando cálculos de hora em hora serão somados a 24 h totais. Então, estas funções não são descritas aqui.

EXEMPLO 19. Determinação de E_{To} com dados de hora em hora

Dados médios de hora em hora entre 02.00 e 03.00 horas e 14.00 e 15.00 horas no dia 1 Outubro em N'Diaye (Senegal) a $16^{\circ}13'N$ e $16^{\circ}15'W$ e 8 m de altitude. Na ausência de calibração dos coeficientes, valores indicados para a_s e b_s (Eq. 35 fórmula de Angstrom) e para os coeficientes da radiação de onda longa líquida (Eq. 39) são usados.

Dados climáticos medidos		02.00-03.00 h	14.00-15.00h	Unidades
T_{hr} : temperatura média de hora em hora =		28	38	°C
RH_{hr} : umidade relativa média de hora em hora =		90	52	%
u_2 : velocidade do vento médio de hora em hora =		1.9	3.3	m/s
R_s : radiação solar de ondas curtas =		-	2.450	MJ m ² h ⁻¹
Parâmetros				
Pela Eq. 13	$\Delta =$	0.220	0.358	kPa °C ⁻¹
Pela Eq. 8	$\gamma =$	0.0673	0.0673	kPa °C ⁻¹
Défice de pressão de vapor				
Pela Eq. 11	$e^*(T) =$	3.780	6.625	kPa
Pela Eq. 54	$e_a =$	3.402	3.445	kPa
-	$e_s - e_a =$	0.378	3.180	kPa

Radiação extraterrestre		02.00-03.00 h	14.00-15.00h	Unidades
Pela Tabela 2.5				
Para 1 de Outubro:	J = 274			-
Pela Eq. 22:	$\phi = \pi / 180 (16.22) = 0.2830$			rad
Pela Eq. 23:	$d_r = 1.0001$			-
Pela Eq. 24:	$\delta = - 0.0753$			rad
Pela Eq. 33:	b = 3.3315			-
Pela Eq. 32:	$S_c = 0.1889$			h
-	$L_z = 15$			grau
-	$L_m = 16.25$			grau
-	t =	2.5	14.5	h
Pela Eq. 31:	$\omega =$	-2.46	0.682	rad
-	$t_1 =$	1	1	h
Pela Eq. 29:	$\omega_1 =$	-	0.5512	rad
Pela Eq. 30:	$\omega_2 =$	-	0.8130	rad

Pela Eq. 28:	$R_a =$	0	3.543	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
Radiação				
Dado	$R_s =$	0	2.450	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
Pela Eq. 37:	$R_{s0} =$	0	2.658	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
Pela Eq. 38:	$R_{is} =$	0	1.887	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
-	$\sigma T_{K^*} =$	1.681	1.915	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
-	$(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) =$	0.082	0.080	-
-	$R_s/R_{s0} =$	0.8 <small>assumed</small>	0.922	-
-	$(1.35 R_s/R_{s0} - 0.35) =$	0.730	0.894	-
Pela Eq. 39:	$R_{nl} =$	0.100	0.137	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
Pela Eq. 40:	$R_l =$	-0.100	1.749	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
Pela Eq. 46, 45:	$G =$	-0.050	0.175	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
-	$(R_l - G) =$	-0.050	1.574	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
-	$0.408(R_l - G) =$	-0.020	0.642	mm/h

Evapotranspiração de referência grama

-	$0.408(R_n - G)$			
-	$\Delta / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)] =$	-0.01	0.46	mm/h
	$37 / (T + 273) u_2 (e_s - e_a)$			
Pela Eq. 53:	$\gamma / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)] =$	0.01	0.17	mm/h
	$ET_o =$	0.00	0.63	mm/h

A evapotranspiração de referência grama é 0.00 mm/h entre 02.00 e 03.00 horas e 0.63 mm/h entre 14.00 e 15.00 horas.

Given relative humidity measurements, the actual vapour pressure is determined as:

$$e_a = e^o(T_{hr}) \frac{RH_{hr}}{100} \quad (54)$$

where e_a average hourly actual vapour pressure [kPa],
 $e^o(T_{hr})$ saturation vapour pressure at air temperature T_{hr} [kPa] (Equation 11),
 RH_{hr} average hourly relative humidity [%].

The net radiation is the difference between the net shortwave radiation (R_{ns}) and the net longwave radiation (R_{nl}) at the hourly time steps. Consequently:

- If R_{ns} and R_{nl} need to be calculated, the extraterrestrial radiation value (R_a) for the hourly period (Equation 28) should be used.
- In the computation of R_{nl} by means of Equation 39, $(\sigma T_{max,K}^4 + \sigma T_{min,K}^4)/2$ is replaced by $\sigma T_{hr,K}^4$ and the Stefan-Boltzman constant becomes:
 $\sigma = (4.903/24) 10^{-9} = 2.043 10^{-10} \text{ MJ m}^{-2} \text{ hour}^{-1}$.

Since the ratio R_s/R_{s0} is used to represent cloud cover, when calculating R_{nl} for hourly periods during the nighttime, the ratio R_s/R_{s0} can be set equal to the R_s/R_{s0} calculated for a time period occurring 2-3 hours before sunset, before the sun angle becomes small. This will generally serve as a good approximation of cloudiness occurring during the subsequent nighttime. The hourly period that is 2 to 3 hours before sunset can be identified during computation of R_a as the period where ω , calculated from Equation 31, is within the range $(\omega_s - 0.79) \leq \omega \leq (\omega_s - 0.52)$, where ω_s is calculated using Equation 25. As a more approximate alternative, one can assume $R_s/R_{s0} = 0.4$ to 0.6 during nighttime periods in humid and subhumid climates and $R_s/R_{s0} = 0.7$ to 0.8 in arid and semiarid climates. A value of $R_s/R_{s0} = 0.3$ presumes total cloud cover.

Soil heat flux is important for hourly calculations. Equations 45 and 46 can be used to derive G for the hourly periods.

The required meteorological data consist of:

- Air temperature: mean hourly temperature (T_{hr}).
- Air humidity: average hourly relative humidity (RH_{hr}).
- Wind speed: average hourly wind speed data measured at 2 m height (u_2).
- Radiation: total hourly solar (R_s) or net radiation (R_n).

Because of the need for standardization, the constants in Equation 53 presume a constant surface resistance (r_s) of 70 s/m during all periods. This constant resistance may cause some underprediction of hourly ET_0 during some daytime periods when actual r_s may be somewhat lower. The constant resistance may cause some overprediction of hourly ET_0 during evening periods when actual r_s may be somewhat higher. However, when the calculations of hourly ET_0 from Equation 53 are summed over 24 hour periods to produce an equivalent 24-hour ET_0 , the hourly differences tend to compensate one another and the results are generally equivalent to calculations of ET_0 made on a 24-hour time step. Precise estimates of ET_0 for specific hourly periods may require the use of aerodynamic stability functions and functions for modifying the value for r_s based on levels of radiation, humidity and temperature. Application of these functions are not normally required when hourly calculations are to be summed to 24-hour totals. Therefore, these functions are not described here.

EXAMPLE 19**Determination of ET_0 with hourly data**

Given mean average hourly data between 02.00 and 03.00 hours and 14.00 and 15.00 hours on 1 October in N'Diaye (Senegal) at $16^{\circ}13'N$ and $16^{\circ}15'W$ and 8 m above sea level. In the absence of calibrated coefficients, indicative values for a_s and b_s (Eq. 35 Angstrom formula) and for the coefficients of the net longwave radiation (Eq. 39) are used.

Measured climatic data		02.00-03.00 h	14.00-15.00 h	Units
T_{hr} : mean hourly temperature =		28	38	$^{\circ}C$
RH_{hr} : mean hourly relative humidity =		90	52	%
u_2 : mean hourly wind speed =		1.9	3.3	m/s
R_s : total solar radiation =		-	2.450	$MJ\ m^{-2}\ hour^{-1}$
Parameters				
From Eq. 13	$\Delta =$	0.220	0.358	$kPa\ ^{\circ}C^{-1}$
From Eq. 8	$\gamma =$	0.0673	0.0673	$kPa\ ^{\circ}C^{-1}$
Vapour pressure deficit				
From Eq. 11	$e^{\circ}(T) =$	3.780	6.625	kPa
From Eq. 54	$e_a =$	3.402	3.445	kPa
-	$e_s - e_a =$	0.378	3.180	kPa

Extraterrestrial radiation		02.00-03.00 h	14.00-15.00 h	Units
From Table 2.5 for 1 October:	$J = 274$			-
From Eq. 22:	$\varphi = \pi/180 (16.22) = 0.2830$			rad
From Eq. 23:	$d_r = 1.0001$			-
From Eq. 24:	$\delta = -0.0753$			rad
From Eq. 33:	$b = 3.3315$			-
From Eq. 32:	$S_c = 0.1889$			hour
-	$L_z = 15$			degrees
-	$L_m = 16.25$			degrees
-	$t =$	2.5	14.5	hour
From Eq. 31:	$\omega =$	-2.46	0.682	rad
-	$t_j =$	1	1	hour
From Eq. 29:	$\omega_1 =$	-	0.5512	rad
From Eq. 30:	$\omega_2 =$	-	0.8130	rad
From Eq. 28:	$R_a =$	0	3.543	$\text{MJ m}^{-2} \text{hour}^{-1}$
Radiation				
Given	$R_s =$	0	2.450	$\text{MJ m}^{-2} \text{hour}^{-1}$
From Eq. 37:	$R_{s0} =$	0	2.658	$\text{MJ m}^{-2} \text{hour}^{-1}$
From Eq. 38:	$R_{ns} =$	0	1.887	$\text{MJ m}^{-2} \text{hour}^{-1}$
-	$\sigma T_K^4 =$	1.681	1.915	$\text{MJ m}^{-2} \text{hour}^{-1}$
-	$(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) =$	0.082	0.080	-
-	$R_s/R_{s0} =$	0.8 (assumed)	0.922	-
-	$(1.35 R_s/R_{s0} - 0.35) =$	0.730	0.894	-
From Eq. 39:	$R_{nl} =$	0.100	0.137	$\text{MJ m}^{-2} \text{hour}^{-1}$
From Eq. 40:	$R_n =$	-0.100	1.749	$\text{MJ m}^{-2} \text{hour}^{-1}$
From Eq. 46, 45:	$G =$	-0.050	0.175	$\text{MJ m}^{-2} \text{hour}^{-1}$
-	$(R_n - G) =$	-0.050	1.574	$\text{MJ m}^{-2} \text{hour}^{-1}$
-	$0.408(R_n - G) =$	-0.020	0.642	mm/hour

Gross reference evapotranspiration				
-	$0.408(R_n - G)$			
-	$\frac{\Delta[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]}{37(T + 273) u_2} (e_s - e_a)$	-0.01	0.46	mm/hour
From Eq. 53:	$\frac{\gamma[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]}{ET_0} =$	0.01	0.17	mm/hour
	$ET_0 =$	0.00	0.63	mm/hour
The gross reference evapotranspiration is 0.00 mm/hour between 02.00 and 03.00 hours and 0.63 mm/hour between 14.00 and 15.00 hours.				

**Ver equações citadas no Boletim FAO56
As versões em inglês e português estão
postadas no site da disciplina**