

### Método de Penman – Monteith

El método de Penman – Monteith puede considerarse como el método estandar de todos los métodos combinados para estimar la evapotranspiración (ET) del cultivo de referencia. La mayoría de los métodos combinados presentan ligeras variaciones dependiendo del tipo de cultivo y de la localización de los instrumentos meteorológicos. Por esta razón, el método de Penman – Monteith utiliza términos como la resistencia aerodinámica del follaje para relacionar la altura de los instrumentos meteorológicos con la altura del cultivo y la resistencia estomática a la transpiración mínima que dependerá del tipo de cultivo y de su altura.

La ecuación de Penman – Monteith se define:

ET = ET radiación + ET aerodinámica

La ecuación final es:

$$ET_o = \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (R_n - G) \frac{10}{L} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \frac{90}{T + 275} u_2 (e_s - e_a) \right]$$

donde

ET<sub>o</sub> = evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día)

$\gamma^*$  = constante psicométrica modificada utilizada en el método de Penman-Monteith (mbar/°C)

$e_s - e_a$  = déficit de presión de vapor (mb)

$e_s$  = presión de vapor a saturación a la temperatura promedio del aire (mb)

$e_a$  = presión de vapor tomada a la temperatura a punto de rocío (mb)

L = calor latente de vaporización (cal/gr)

$\Delta$  = pendiente de la curva de presión de la saturación de vapor a una temperatura específica (mbar/°C)

$\gamma$  = constante psicométrica

$R_n$  = energía de radiación neta (cal/(cm<sup>2</sup> día)

T = temperatura promedio (°C)

G = flujo termal del suelo (cal/cm<sup>2</sup>)

### Ejemplo

Calcular la evapotranspiración para el mes de mayo por el método de Penman – Monteith, para la ciudad de Torreón, utilizando el cuadro con información climatológica ya visto.

Información requerida:

Horas luz (mes mayo) = 9 horas

Latitud y mes = 25° 33' LN mes de mayo

Albedo ( $\alpha$ ) = 0.25 (constante)

Temperatura promedio = 27.3 ° C

Temperatura a punto de rocío = información no disponible

Humedad relativa promedio = 52.4 %

Elevación sobre el nivel del mar = 1130 msnm

velocidad del viento (día) = 6.6 m/s

velocidad del viento (noche) = información no disponible

altura de las mediciones = 2 m

Cálculos:

Primer paso: Se calcula la radiación solar neta ( $R_n$ )

La radiación solar neta puede estimarse directamente usando un radiómetro neto hemisférico o estimarse a partir de los componentes de las radiaciones netas de onda corta y de onda larga que son absorbidas por la superficie del suelo.

$$R_n = R_{n_{oc}} - R_{n_{ol}}$$

$R_n$  = radiación solar neta ( $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{día}$ )

$R_{n_{oc}}$  = radiación de onda corta ( $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{día}$ )

$R_{n_{ol}}$  = radiación de onda larga ( $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{día}$ )

$$R_{n_{oc}} = (1 - \alpha)R_s$$

$\alpha$  = albedo (0.25)

La radiación de onda larga ( $R_{n_{ol}}$ ) se estima con la siguiente ecuación:

$$R_{n_{ol}} = \left[ a_1 \frac{R_s}{R_{so}} + b_1 \right] R_{bo}$$

$a_1$  y  $b_1$  = coeficientes experimentales que dependen de la región climática (cuadro 3)

$R_{bo}$  = la radiación neta de onda larga en un día sin nubes ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )

$$R_{bo} = \varepsilon * \sigma * T_k^4$$

$\varepsilon$  = emisividad

$$\varepsilon = -0.02 + 0.261e^{\left[ -7.77 \times 10^{-4}(T_k^2) \right]}$$

$\sigma$  = constante de Stefan Boltzman ( $\sigma = 11.71 \times 10^{-8} \text{ cal}/(\text{cm}^2/\text{°K}^4 \text{ día})$ )

$T_k$  = temperatura promedio ( $T_k^4 = (T_k^4 \text{ max} + T_k^4 \text{ min})/2$ ), donde las temperaturas deben expresarse en grados kelvin ( $T_k = \text{°C} + 273$ )

$R_s$  = radiación de onda corta que alcanza la superficie de la tierra en un plano horizontal ( $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{día}$ ) se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_s = \left[ 0.25 + 0.50 \frac{n}{N} \right] R_{so}$$

$R_{so}$  = radiación solar total recibida en la superficie del suelo en un día sin nubes ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ ) Cuadro 2.

$n$  = horas reales de luz diaria (pueden medirse con el heliógrafo de Campbell)

$N$  = fotoperíodo u horas máximas de insolación diaria. Son las horas si no hubiera nubosidad (Cuadro 1)

Del Cuadro 1 se obtiene que para el mes de mayo  $N = 9.35$  (interpolación latitud y mes)

CUADRO No. 1 FOTOPERIODO O PROMEDIO MENSUALES DE LAS MAXIMAS HORAS DIARIAS DE LUZ POSIBLES PARA CADA MES Y LATITUD

LAT NORTE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	8.50	7.66	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50
5	8.32	7.57	8.47	8.29	8.65	8.41	8.67	8.60	8.23	8.42	8.07	8.30
10	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.60	8.86	8.71	8.25	8.34	7.91	8.10
14	7.98	7.39	8.43	8.43	8.94	8.77	9.00	8.80	8.27	8.27	7.79	7.93
16	7.91	7.35	8.42	8.47	9.01	8.85	9.08	8.85	8.28	8.23	7.72	7.83
18	7.83	7.31	8.41	8.50	9.08	8.93	9.16	8.90	8.29	8.20	7.65	7.74
20	7.74	7.25	8.41	8.52	9.15	9.00	9.25	8.96	8.30	8.18	7.58	7.66
22	7.67	7.21	8.40	8.56	9.22	9.11	9.32	9.01	8.30	8.13	7.51	7.56
24	7.58	7.16	8.39	8.60	9.30	9.19	9.40	9.06	8.31	8.10	7.44	7.47
26	7.49	7.12	8.38	8.64	9.37	9.29	9.49	9.11	8.32	8.06	7.36	7.37
28	7.40	7.07	8.37	8.67	9.46	9.39	9.58	9.17	8.32	8.02	7.28	7.27
30	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.33	7.99	7.19	7.15
32	7.20	6.97	8.37	8.76	9.62	9.59	9.77	9.27	8.34	7.95	7.11	7.05
34	7.10	6.91	8.36	8.80	9.72	9.70	9.88	9.33	8.36	7.90	7.02	6.92
40	6.76	6.72	8.33	8.95	10.02	10.08	10.22	9.54	8.39	7.75	6.72	6.52
46	6.34	6.50	8.29	9.12	10.39	10.54	10.64	9.79	8.42	7.57	6.36	6.04
50	5.98	6.30	8.24	9.24	10.68	10.91	10.99	10.11	8.46	7.45	6.10	6.65
56	5.30	5.95	8.15	9.45	11.22	11.67	11.69	10.40	8.53	7.21	5.54	4.89
60	4.67	5.65	8.08	9.65	11.74	12.39	12.31	10.70	8.57	6.98	5.04	4.22

Dado que no existe el valor exacto de 25° 33' se hace una interpolación para conocer el valor de N para el mes de mayo. Se toman los valores de 24° y 26° para realizar la interpolación.

LAT NORTE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
24	7.58	7.16	8.39	8.60	9.30	9.19	9.40	9.06	8.31	8.10	7.44	7.47
26	7.49	7.12	8.38	8.64	9.37	9.29	9.49	9.11	8.32	8.06	7.36	7.37
2°	0.09	0.04	0.01	-0.04	-0.07	-0.10	-0.09	-0.05	-0.01	0.04	0.08	0.10
1.55°	0.07	0.031	0.008	-0.031	-0.054	-0.077	-0.07	-0.039	-0.008	0.031	0.062	0.077
25° 33'	7.51	7.13	8.38	8.63	9.35	9.27	9.47	9.10	8.32	8.07	7.38	7.39

El mismo procedimiento se realiza para calcular el valor de Rso con la ayuda del Cuadro No. 2

CUADRO No. 2.- RADIACION SOLAR PROMEDIO PARA CIELO SIN NUBES (RSO) CALCULADOS DE BUDYKO (1963) EXPRESADOS EN CAL/CM<sup>2</sup>/DIA

Lat	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
60	58	152	319	533	671	763	690	539	377	197	87	35
55	100	219	377	558	690	780	706	577	430	252	133	74
50	155	290	429	617	716	790	729	616	480	313	193	126
45	216	365	477	650	729	797	748	648	527	371	260	190
40	284	432	529	677	742	800	755	674	567	426	323	248
35	345	496	568	700	742	800	761	697	603	474	380	313
30	403	549	600	713	742	793	755	703	637	519	437	371
25	455	595	629	720	742	780	745	703	660	561	486	423
20	500	634	652	720	726	760	729	697	680	597	537	474
15	545	673	671	713	706	733	706	684	697	623	580	519
10	584	701	681	707	684	700	681	665	707	648	617	565
5	623	722	690	700	652	663	645	645	710	665	650	606
0	652	740	694	680	623	627	616	623	707	684	680	619
5	648	758	690	663	590	587	577	590	693	690	727	677
10	710	772	681	640	571	543	526	558	680	690	727	710
15	729	779	665	610	516	497	497	519	657	687	747	739
20	748	779	645	573	474	447	445	481	630	677	753	761
25	761	779	626	533	419	400	406	439	600	665	767	777
30	771	772	600	497	384	353	358	390	567	648	767	793
35	774	754	568	453	335	300	310	342	530	629	767	806
40	774	729	529	407	281	243	261	290	477	603	760	813
45	774	704	490	357	229	187	203	235	477	571	747	813
50	761	669	445	307	174	127	148	177	400	535	727	806
55	748	630	397	250	123	77	97	123	343	497	707	794
60	729	588	348	187	77	33	52	74	283	455	700	787

Dado que no existe el valor exacto de 25° 33' se hace una interpolación para conocer el valor de Rso para el mes de mayo. Se toman los valores de 25° y 30° para realizar la interpolación.

Lat	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
30	403	549	600	713	742	793	755	703	637	519	437	371
25	455	595	629	720	742	780	745	703	660	561	486	423
5	52	46	29	7	0	-13	-10	0	23	42	49	52
0.55	5.72	5.06	3.19	0.77	0	-1.43	-1.1	0	2.53	4.62	5.39	5.72
25° 33'	449.28	589.94	625.81	719.23	742	781.43	746.1	703	657.47	556.38	480.61	417.28

Rso = 742 cal/cm<sup>2</sup>/día (Cuadro 2, con latitud y mes)

$$R_s = \left[ 0.25 + 0.50 \frac{9.0}{9.33} \right] (742) = 542.6 \text{ cal / cm}^2 / \text{ día}$$

$$Tk = \frac{[(34.6 + 273)^4 + (20 + 273)^4]}{2} = 8161285654$$

$$\varepsilon = -0.02 + 0.261e^{\left[-7.77 \times 10^{-4}(27.3^2)\right]} = 0.126$$

$$R_{bo} = 0.126 * 11.71 \times 10^{-8} * 8161285654 = 120.4 \text{ cal/cm}^2$$

Del Cuadro No. 3 se toman los valores de  $a_1$  y  $b_1$  considerando que la zona de Torreón corresponde a una región árida. Los valores de  $a_1 = 1.2$  y  $b_1 = -0.2$

CUADRO No. 3.- COEFICIENTES EXPERIMENTALES PARA LA ECUACION DE  $R_{nOL}$  ( $a_1$  y  $b_1$ ) JENSEN, 1974

REGION	$a_1$	$b_1$
DAVIS, CALIFORNIA	1.35	-0.30
SUR DE IDAHO	1.22	-0.18
REGIONES ARIDAS	1.20	-0.20
REGIONES HUMEDAS	1.00	0.00
REGIONES SEMIHUMEDAS	1.10	-0.10

$$R_{n_{OL}} = \left[ 1.2 \frac{542.6}{742} + -0.2 \right] 120.4 = 81.6 \text{ cal/cm}^2$$

$$R_{n_{OC}} = (1 - 0.25) * 542.6 = 407.0 \text{ cal/cm}^2$$

$$R_n = 407.0 - 81.6 = 325.4 \text{ cal/cm}^2$$

Segundo Paso .- Se calcula el déficit de presión de vapor ( $e_s - e_a$ )

$$e_s - e_a = e_s - e_s \left( \frac{HR_{prom}}{100} \right)$$

$$e_s = 6.328 + 0.424 * (T_{prom}) + 0.01085 * (T_{prom})^2 + 0.000519 * (T_{prom})^3$$

$$e_s = 6.328 + 0.424 * (27.3) + 0.01085 * (27.3)^2 + 0.000519 * (27.3)^3 = 36.5 \text{ mb}$$

$$e_s - e_a = 36.5 - 36.5 \left( \frac{52.4}{100} \right) = 17.4 \text{ mb}$$

Tercer paso.- Se calculan los factores de ajuste por temperatura y humedad

Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ( $\Delta$ )

$$\Delta = 2.0 (0.00738 * T_{prom} + 0.8072)^7 - 0.00116$$

$$\Delta = 2.0 (0.00738 * 27.3 + 0.8072)^7 - 0.00116 = 2.12 \text{ mb/}^\circ\text{C}$$

Constante psicométrica ( $\gamma$ )

$$\gamma = \frac{0.386 * Pb}{L}$$

Pb = presión barométrica promedio (mb)

$$Pb = 1013 - 0.1055 * E$$

E = elevación de la zona (msnm)

$$Pb = 1013 - 0.1055 * 1130 = 893.8 \text{ mb}$$

L = calor latente de vaporización (cal/gr)

$$L = 595 - 0.51 T_{prom}$$

$$L = 595 - 0.51 (27.3) = 581.1 \text{ cal/gr}$$

$$\gamma = \frac{0.386 * 893.8}{581.1} = 0.5937 \text{ mbar/}^{\circ}\text{C}$$

La constante psicométrica modificada ( $\gamma^*$ )

$$\gamma^* = \gamma (1 + 0.33 u_2)$$

$u_2$  = velocidad del viento de día (m/s)

$$\gamma^* = 0.5937 (1 + 0.33 * 6.6) = 1.8868$$

Factor de ajuste por temperatura considerando la constante psicométrica modificada

$$\left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} \right] = \left[ \frac{2.12}{2.12 + 1.8868} \right] = 0.5291$$

Factor de ajuste por humedad considerando la constante psicométrica modificada

$$\left[ \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \right] = \left[ \frac{0.5937}{2.12 + 1.8868} \right] = 0.1482$$

Asumiendo que  $G = 0$

$$ET_o = \left[ 0.5291 (325.4 - 0) \frac{10}{581.1} + 0.1482 \frac{90}{27.3 + 275} 6.6 (17.4) \right] = 8.03 \text{ mm/día}$$

$ET_o$  = ET radiación + ET aerodinámica

$$ET_o = 2.96 + 5.07 = 8.03 \text{ mm/día}$$