

Método de cálculo de la variable “Evapotranspiración de referencia ” (alias = eto)

La “Evapotranspiración de referencia” ETo_p^m (en “mm”), es calculada mediante el modelo físico de “Penman-Monteith FAO98” adaptado a zonas de montaña ([Ecuación de la Evapotranspiración de Penman-Monteith modificada con la variable fisiográfica “Incidencia Solar”](#)), en los periodos anual, mensual y estacional (p) (anual, enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre, invierno, primavera, verano y otoño), para los diferentes periodos climáticos preestablecidos (m) (1961-1990, 1985-2014, 2015-2040, 2021-2050, 2031-2060, 2041-2070, 2051, 2080, 2061-2090, 2071-2100) es calculada con los datos registrados o estimados (histórico observado) o proyectados (por cada combinación de Modelo de Circulación General (MCG) y escenario de emisiones (ESN)) representados por los modelos raster de las de variables territoriales que integran la siguiente expresión:

$$ETo_p^m = \frac{0.408 \cdot \Delta_p^m \cdot (RN_p^m - G_p^m) + \gamma_p^m \cdot \left(\frac{900}{Tmed_p^m + 273} \right) \cdot v_p^m \cdot ([e_{s}]_p^m - [e_a]_p^m)}{\Delta_p^m + \gamma_p^m \cdot (1 + 0.34 \cdot v_p^m)} \cdot N_p$$

donde VAR_p^m se lee como la variable de alias VAR en el periodo intranual p y periodo climático m , y:

$ETo_p^m \Rightarrow$ Evapotranspiración de referencia en el periodo intranual p y en el periodo climático m (mm)

$$\Delta_p^m = \frac{2503.6 \cdot e^{\frac{17.27 \cdot Tmed_p^m}{Tmed_p^m + 237.3}}}{Tmed_p^m + 237.3} \Rightarrow \text{pendiente de la curva de tensión de vapor saturado (KPa/°C)}$$

$Tmed_p^m \Rightarrow$ temperatura media del aire (°C)

$RN_p^m = RNoc_p^m - Rol_p^m \Rightarrow$ radiación solar neta sobre el plano horizontal en MJ/ (m² · día)

$$RNoc_p^m = (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{2 + \alpha \cdot (1 - \cos(p))}{2} \right) \cdot k \cdot R_a \cdot \sqrt{Tmax_p^m - Tmin_p^m} \cdot \frac{S_p}{sh_p \cdot \cos(p)} \Rightarrow \text{(radiación neta (MJ/m}^2\text{))}$$

$\alpha \Rightarrow$ albedo (adimensional)

$p \Rightarrow$ pendiente del terreno (radianes)

$k \Rightarrow 0.16$ en zonas costeras y 0.19 en zonas continentales sin influencia de cuerpos de agua

$Ra_p \Rightarrow$ radiación solar extraterrestre (MJ/m² · día) (tabla 1)

$Tmax_p^m \Rightarrow$ temperatura máxima del aire (°C)

$Tmin_p^m \Rightarrow$ temperatura mínima del aire (°C)

$S_p \Rightarrow$ incidencia solar del terreno, con orientación, pendiente y proyección de sombras (horas)

$sh_p \Rightarrow$ incidencia solar sobre una superficie horizontal y sin obstáculos en el horizonte (horas)

$$Rol_p^m = \sigma \cdot \frac{(273 + Tmax_p^m)^4 + (273 + Tmin_p^m)^4}{2 \cdot \cos(p)} \cdot (0.34 - 0.14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot (a_1 \cdot NR_p^m - b_1) \Rightarrow \text{(radiación de onda larga (MJ/m}^2\text{))}$$

$\sigma \Rightarrow$ constante de Stefan-Boltzmann (4.903 10⁻⁹ MJ/ K⁴ · m² · día)

$$[e_a]_p^m = 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot \left[e^{\frac{17.27 \cdot Tmax_p^m}{Tmax_p^m + 237.3}} \cdot HRmin_p^m + e^{\frac{17.27 \cdot Tmin_p^m}{Tmin_p^m + 237.3}} \cdot HRmax_p^m \right] \Rightarrow \text{presión de vapor actual (KPa)}$$

$HRmin_p \Rightarrow$ humedad relativa mínima (%)

$HRmax_p^m \Rightarrow$ humedad relativa máxima (%)

$G_p^m = 0.07 \cdot (Tmed_{p+1}^m - Tmed_{p-1}^m) \Rightarrow$ flujo de calor hacia el suelo (MJ/m² · día)

$Tmed_{p+1}^m \Rightarrow$ temperatura media del periodo posterior (°C)

$Tmed_{p-1}^m \Rightarrow$ temperatura media del periodo anterior ($^{\circ}C$)

$$\gamma = 0.001628 \cdot 101.3 \cdot \frac{(293 - 0.0065 \cdot h)^{5.26}}{293^{5.26} \cdot (2.501 - 0.002361 \cdot Tmed_p^m)} \Rightarrow \text{constante psicrométrica (KPa/}^{\circ}C)$$

$Tmed_p^m \Rightarrow$ temperatura media del aire ($^{\circ}C$)

$$v_p^m = \frac{4.87 \cdot vz_p^m}{\ln(67.8 \cdot z - 5.42)} \Rightarrow \text{velocidad media del viento a 2 metros de altura (m/s)}$$

$vz_p^m \Rightarrow$ velocidad del viento a z metros (m/s)

$$[e_s]_p^m = 0.305 \cdot \left[e^{\frac{17.27 \cdot Tmax_p^m}{Tmax_p^m + 237.3}} + e^{\frac{17.27 \cdot Tmin_p^m}{Tmin_p^m + 237.3}} \right] \Rightarrow \text{presión de vapor saturado (KPa)}$$

$N_p \Rightarrow$ número de días del periodo p

Tipo de región	a ₁	b ₁
Regiones áridas	1.20	-0.20
Regiones húmedas	1.00	0.00
Regiones semihúmedas	1.10	-0.10

Tabla 2.- Coeficientes experimentales a₁ y b₁. Jensen, 1974

La ecuación ETo_p^m es aplicada para cada periodo mensual donde cada variable generica VAR_p^m representa los valores medios del periodo intranual p y periodo climático m del día central del mes, para posteriormente aplicarlo al resto del periodo multiplicando por el numero de días del mes N_p .

El modelo "FAO Penman Monteith56" o "Penman-Monteith FAO98" es el método más preciso para calcular la evapotranspiración de referencia (ETo), un parámetro básico para conocer y evaluar el régimen hídrico de un cultivo o ecosistema. Se trata de una función compleja y dependiente de multitud de variables, cada una de las cuales constituye a su vez un método con suficiente entidad como para discutirlo pormenorizadamente. Se trata de un modelo matemático deducido a partir del modelo físico de conservación de energía, en el que están implicados todos los flujos de intercambio energético del interfaz suelo-atmosfera, entre ellos el cambio de estado del agua de líquido a vapor, ya sea directo por evaporación en el suelo o transpiración en las plantas. Su formulación ha pasado diversas etapas a lo largo de su historia, perfeccionando la metodología no solo para hacerla más precisa y extensible, sino también más fácil de aplicar con las variables meteorológicas de las que normalmente se dispone. Sin embargo, esta metodología está muy enfocada al cálculo de la evapotranspiración de referencia de un cultivo, generalmente asentados en lugares donde la climatología se ve poco afectada por las condiciones particulares a las que puede dar un relieve montañoso, es decir, el flujo de radiación solar entrante se realiza sobre un plano horizontal y sin obstáculos en el horizonte que puedan proyectar sombras.

Bajo estas condiciones, incluso en terrenos ondulados, el efecto del relieve tiene poca importancia sobre la ETo o queda compensada cuando los cálculos se realizan a nivel regional. Sin embargo, bajo las condiciones que imponen las áreas montañosas, lugar donde se asientan buena parte de los ecosistemas o masas forestales, la modulación de la evapotranspiración a causa del efecto combinado de la pendiente, orientación y encajonamiento de valles y barrancos, es sumamente importante. Este efecto es uno de los que dan lugar a la alta variabilidad microclimática característica de las zonas montañosas y como consecuencia, la variabilidad propia de los hábitats que acogen a unas comunidades vegetales u otras, alterando directamente la producción primaria del sitio o estación forestal. El efecto del relieve en la ETo tiene una repercusión directa sobre el régimen hídrico, compensando en los lugares umbríos y poco expuestos a la radiación, el déficit hídrico propio de las condiciones generales del clima, resurgiendo en estos, enclaves de vegetación propia de zonas más húmedas, o todo lo contrario, ya que en zonas expuestas a sol, la amplificación de la radiación solar puede dar lugar a un régimen hídrico muy severo.

Por esta razón el modelo clásico de "Penman-Monteith FAO98" es adaptado a las zonas de montaña mediante la introducción del "modelo de incidencia solar" (s_p y sh_p), un parámetro puramente

geométrico, relacionado con el movimiento estacional y relativo del sol sobre un relieve determinado, a partir del cual es reconstruido el cálculo de la radiación solar y evapotranspiración de referencia. De esta manera, los parámetros de pendiente y orientación son incluidos en la evapotranspiración de manera intrínseca a la hora de definir el hábitat de una especie vegetal.

Latitud	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agoto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
70	0.0	2.6	10.4	23.0	35.2	42.5	39.4	28.0	14.9	4.9	0.1	0.0
68	0.1	3.7	11.7	23.9	35.3	42.0	38.9	28.6	16.1	6.0	0.7	0.0
66	0.6	4.8	12.9	24.8	35.6	41.4	38.8	29.3	17.3	7.2	1.5	0.1
64	1.4	5.9	14.1	25.8	35.9	41.2	38.8	30.0	18.4	8.5	2.4	0.6
62	2.3	7.1	15.4	26.6	36.3	41.2	39.0	30.6	19.5	9.7	3.4	1.3
60	3.3	8.3	16.6	27.5	36.6	41.2	39.2	31.3	20.6	10.9	4.4	2.2
58	4.3	9.6	17.7	28.4	37.0	41.3	39.4	32.0	21.7	12.1	5.5	3.1
56	5.4	10.8	18.9	29.2	37.4	41.4	39.6	32.6	22.7	13.3	6.7	4.2
54	6.5	12.0	20.0	30.0	37.8	41.5	39.8	33.2	23.7	14.5	7.8	5.2
52	7.7	13.2	21.1	30.8	38.2	41.6	40.1	33.8	24.7	15.7	9.0	6.4
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	14.7	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	24.4	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
18	27.9	31.5	35.2	38.0	39.0	39.1	38.9	38.2	36.1	32.5	28.7	26.8
16	28.9	32.3	35.7	38.1	38.7	38.6	38.5	38.1	36.4	33.2	29.6	27.9
14	29.9	33.1	36.1	38.1	38.4	38.1	38.1	38.0	36.7	33.9	30.6	28.9
12	30.9	33.8	36.5	38.0	38.0	37.6	37.6	37.8	36.9	34.5	31.5	30.0
10	31.9	34.5	36.9	37.9	37.6	37.0	37.1	37.5	37.1	35.1	32.4	31.0
8	32.8	35.2	37.2	37.8	37.1	36.3	36.5	37.2	37.2	35.6	33.3	32.0
6	33.7	35.8	37.4	37.6	36.6	35.7	35.9	36.9	37.3	36.1	34.1	32.9
4	34.6	36.4	37.6	37.4	36.0	35.0	35.3	36.5	37.3	36.6	34.9	33.9
2	35.4	37.0	37.8	37.1	35.4	34.2	34.6	36.1	37.3	37.0	35.6	34.8
0	36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6

Tabla 1. Radiación Extraterrestre R_a , en función de la latitud y mes del año en MJ/m²-día (hemisferio norte).

Es posible que la ecuación ET_o^m de lugar a valores negativos en periodos del año fríos y húmedos, y lugares poco expuestos a la radiación solar. Estos valores negativos pueden ser interpretados como una condensación neta de agua como rocío o escarcha que no desaparece en todo el día. En el caso de querer evitar estos valores, el modelo debe incluir la siguiente condición:

$$RN_p^m = \text{con}(RoI_p^m > RNoc_p^m, 0, RNoc_p^m - RoI_p^m) \quad \text{haciendo que la radiación neta nunca sea negativa.}$$

También es posible obtener valores anómalos fuera de rango en zonas poco expuestas al sol y con mucha pendiente, donde la superficie del relieve real toma valores muy altos por el factor $1/\cos(p)$.

Más información: en <https://www.cma.junta-andalucia.es/medioambiente/portal/documents/20151/401018/Deteccion-de-Oasis-Orograficos.pdf/75da7617-619e-0f67-3375-e01abf28ce9a?t=1425391768000>.

La nomenclatura del nombre del fichero que almacena los datos de la variable “Evapotranspiración de referencia” es la siguiente:

eto_<MCG>_<ESN>_d<m>_<p>_COG.tif

eto = alias de “Evapotranspiración de referencia”

MCG = nombre del Modelo de Circulación General

ESN = nombre del Escenario de Emisiones de GEI

m = periodo interanual

p = periodo intranual