

# SIMPLIFICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE FAO PENMAN-MONTEITH PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA A PARTIR DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL.

Gavilán, S.<sup>1</sup>, Quignard, I.<sup>3</sup> y P.G. Aceñolaza<sup>2,4</sup>, Pastore, J. I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Procesamiento Digital de Imágenes, ICyTE-CONICET-UNMDP. Juan B. Justo 4302, Mar del Plata, Argentina. [gavilan@agro.uba.ar](mailto:gavilan@agro.uba.ar), [juan.pastore@gmail.com](mailto:juan.pastore@gmail.com)

<sup>2</sup> CICYTTP-CONICET. España 149, Diamante (3101), Entre Ríos, Argentina. [acenolaza@gmail.com](mailto:acenolaza@gmail.com)

<sup>3</sup> Facultad de Ciencia y Tecnología - Universidad Autónoma de Entre Ríos. Ruta 11 km 10,5, Oro Verde (3101) Entre Ríos, Argentina. [ignacioquignard@gmail.com](mailto:ignacioquignard@gmail.com)

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos. Ruta 11 km 10,5, Oro Verde (3101) Entre Ríos, Argentina. [pablo.acenolaza@fca.uner.edu.ar](mailto:pablo.acenolaza@fca.uner.edu.ar)

Resumen : La evapotranspiración (ET) representa el transporte de agua desde la tierra y cuerpos de agua de regreso a la atmósfera y en sentido contrario a la precipitación. Existen muchas ecuaciones propuestos para estimar ET basados en la temperatura, en la radiación, en la transferencia de masa y combinados. Para calcularlas se necesitan mediciones en estaciones meteorológicas profesionales. El objetivo de este trabajo es simplificar la ecuación de FAO Penman-Monteith a partir del análisis de regresión lineal de las variables meteorológicas más comúnmente medidas en estaciones meteorológicas no profesionales. Se probaron modelos de regresión lineal para cada una de las variables por separado y para todas en conjunto y se seleccionaron aquellos que superan el valor de 0,7 de R<sup>2</sup>. Los modelos que superaron el umbral de R<sup>2</sup> propuesto fueron el modelo compuesto por todas las variables (M1, R<sup>2</sup>=0,9409) y el modelo compuesto solamente por la radiación solar (M2, R<sup>2</sup>=0,7038).

Palabras claves: *evapotranspiración, FAO penman-monteith, análisis de regresión.*

2000 AMS Subjects Classification: 9255

## 1. INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración (ET) representa el transporte de agua desde la tierra y cuerpos de agua, a través de la vegetación si existiera, de regreso a la atmósfera en sentido contrario a la precipitación [1][2]. Es un componente importante del equilibrio hídrico y su medición se utiliza ampliamente en muchos campos como la agronomía, hidrología, climatología, meteorología, ecología y ciencias ambientales [3]. Es una variable importante para cuantificar el balance hídrico en todas las escalas, desde el campo hasta la cuenca, con el objetivo de comprender mejor el comportamiento hidrológico del paisaje y mejorar la utilización de los recursos hídricos [4],[5]. El término evapotranspiración potencial (ET<sub>P</sub>) se refiere a la cantidad de agua que podría pasar a la atmósfera si la disponibilidad hídrica fuera ilimitada, por lo tanto, es una variable climática [6]. Por otra parte, el término evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>0</sub>) se refiere a la cantidad de agua depositada en la atmósfera por un cultivo hipotético de pasto de 0,12 m de altura, con una resistencia fija de 70 s/m, un albedo de 0,23, con buena disponibilidad hídrica y que sombrea completamente el suelo [7][8]. Existen muchas ecuaciones propuestos para estimar ET<sub>P</sub> y ET<sub>0</sub> que pueden clasificarse en métodos basados en la temperatura, en la radiación, en la transferencia de masa y combinados, todos ellos basados en diferentes tipos de mediciones de variables meteorológicas [7].

El método de FAO Penman-Monteith fue seleccionado por expertos como el modelo más consistente para obtener valores de ET<sub>0</sub> en todas las regiones y climas [9]:

$$ET_0 = \frac{0.408 \times (R_N - G) + \gamma \times \frac{900}{T_{media} + 273} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0.34 \times u_2)}$$

Ecuación de FAO-Penman Monteith: ET<sub>0</sub> es la evapotranspiración de referencia (mm/día); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/C°); R<sub>N</sub> es la radiación neta (MJ/m<sup>2</sup>/día), G es el flujo de calor del suelo (MJ/m<sup>2</sup>/día), γ es la constante psicométrica (kPa /C°), T<sub>media</sub> es la temperatura media diaria (C°), u<sub>2</sub> es la velocidad del viento a 2 m de altura (m/s), e<sub>s</sub> es la presión de vapor del aire en saturación (kPa); y e<sub>a</sub> es la presión de vapor real (kPa) [9].

El objetivo de este trabajo es simplificar la ecuación de FAO Penman-Monteith a partir del análisis de regresión lineal de las variables meteorológicas más comúnmente medidas en estaciones meteorológicas no profesionales (Radiación solar, humedad relativa, temperatura media y velocidad del viento).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 DATOS METEOROLÓGICOS

Para este estudio se utilizó una recopilación histórica de datos meteorológicos provenientes del Observatorio Agrometeorológico de la Estación Experimental Agropecuaria INTA Paraná (Ubicado en la localidad de Oro Verde). En este observatorio se registran datos de temperatura del aire, humedad relativa, tensión de vapor, déficit de saturación y punto de rocío en abrigo meteorológico y de heliofanía efectiva y rocío. Con estas mediciones se llevan a cabo los cálculos de evapotranspiración ( $ET_0$ ) con la ecuación de FAO Penman-Monteith. Para este estudio se utilizaron los datos de radiación solar ( $R_s$ ), humedad relativa (HR), temperatura media ( $T_m$ ) y velocidad del viento ( $V_v$ ).

### 2.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A partir de una base de datos meteorológicos diarios completa de 16 años consecutivos (desde el 1/01/2000 hasta el 31/12/2015) se probaron modelos de regresión lineal para cada una de las variables por separado y para todas en conjunto, y se seleccionaron aquellos que superan el valor de 0,7 de  $R^2$ . El set de datos completo (5830 registros diarios) fue dividido en 70% para modelado (4122 registros) y 30% para validación (1708 registros).

## 3. RESULTADOS

Se realizaron, con el software estadístico R diferentes modelos nombrados en la Tabla 1 como M1, M2, M3, M4 y M5. Los modelos que se tuvieron en cuenta para este trabajo son aquellos que superaron el umbral de  $R^2$  propuesto y fueron el modelo M1, compuesto por todas las variables, con un  $R^2 = 0,9409$  y el modelo M2, compuesto únicamente por la radiación solar con un  $R^2 = 0,7038$ . A continuación, se muestran los modelos obtenidos para la estimación de  $ET_0$  que simplifican la ecuación de FAO Penman-Monteith.

Ecuación del modelo M1:

$$ET_0 = -0.6643898 + 0.1620136 * R_s - 0.0218506 * HR + 0.1236492 * T_m + 0.0940959 * V_v$$

Ecuación del modelo M2:

$$ET_0 = -0.084484 + 0.220764 * R_s$$

Donde  $R_s$  es la radiación solar, HR es la humedad relativa,  $T_m$  es la temperatura media y  $V_v$  velocidad del viento.

Tabla 1: Resultado de los modelos de regresión lineal para todas las variables (M1) y para cada variable por separado (M2:M5).

Nombre del modelo	Variabes	Estadístico f	Error estándar residual	Grados de libertad	p valor	$R^2$
M1	$R_s$ , HR, $T_m$ , $V_v$	1.619e+04	0.4744	4069	< 2.2e-16	0.9409
M2	$R_s$	9790	1.095	4120	< 2.2e-16	0.7038
M3	HR	2548	1.581	4120	< 2.2e-16	0.3821
M4	$T_m$	3329	1.496	4120	< 2.2e-16	0.4469
M5	$V_v$	12.27	1.947	4072	0.0004664	0.003003

Analizando cada una de las variables por separado, se observan valores p altamente significativos y esto se debe a la gran cantidad de grados de libertad de los modelos, sin embargo, no todas las variables superan el umbral de  $R^2$  (Figura 1).

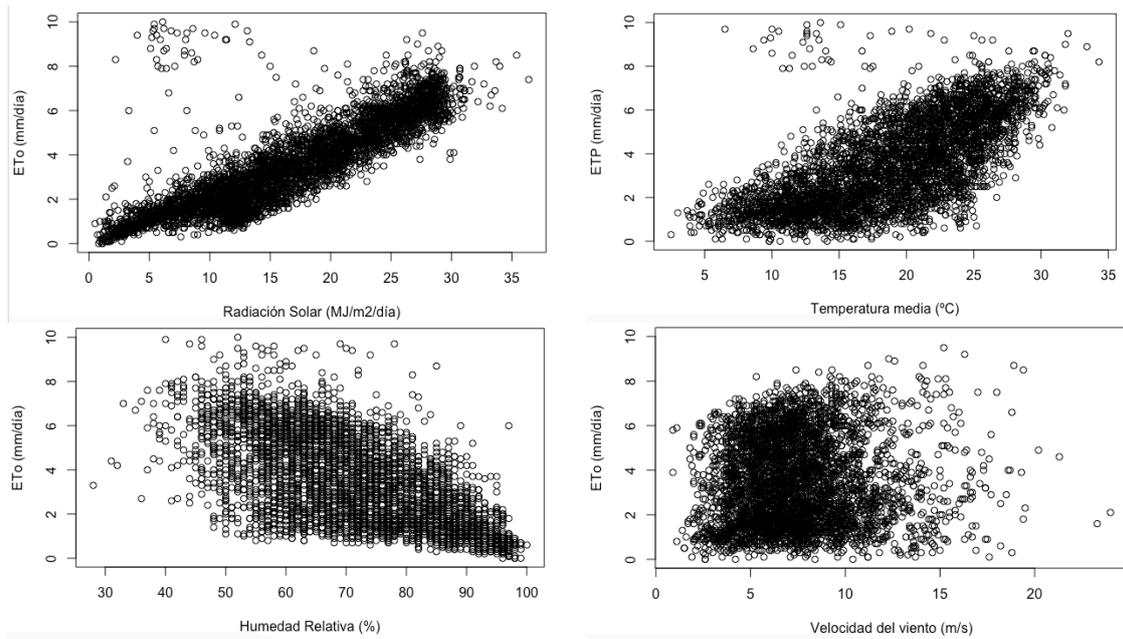


Figura 1: Gráficos de dispersión de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>) en función de cada variable meteorológica.

A partir de los registros del set de datos de validación se evaluó la precisión de los modelos. El modelo M1 muestra menores diferencias que el modelo M2 con respecto a las estimaciones de la ecuación de FAO-PM (Tabla 2, Figura 2).

Tabla 2: Resultados de la evaluación de la precisión de los modelos de regresión lineal generados con todas las variables (M1) y con la radiación solar (M2).

Modelo	Media (mm/día)	Desvío Estándar (mm/día)	RMSE (mm/día)	Diferencia absoluta media (mm/día)	Máxima diferencia absoluta (mm/día)
FAO-PM	3,45	1,95	0	0	0
M1	3.44	1,89	0,47	0,35	2,43
M2	3,53	1,67	0,82	0,63	4,23

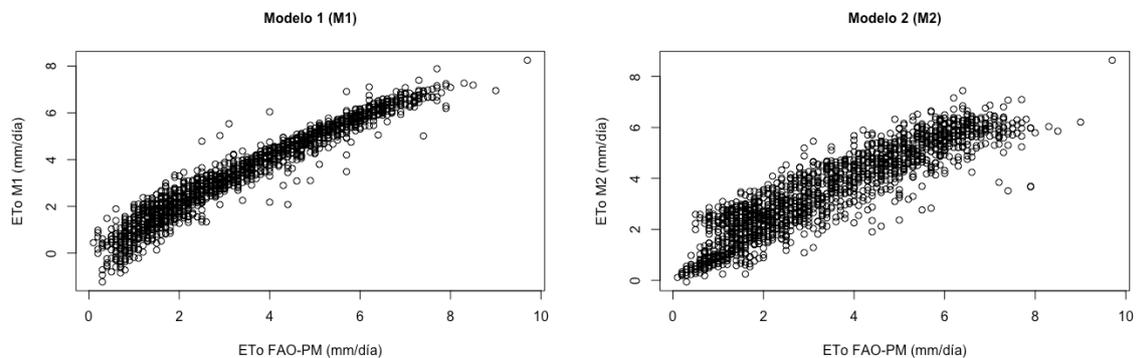


Figura 2: Gráficos de dispersión de los resultados de los modelos seleccionados versus valores de ET<sub>0</sub> estimados por la ecuación de FAO Penman-Monteith.

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Como puede verse en los resultados, la única variable que por sí sola puede confeccionar un modelo de estimación de la evapotranspiración de referencia simulando los resultados de la ecuación de FAO Penman-Monteith es la radiación solar ( $R_s$ ). Esto es importante ya que se podría confeccionar un sistema electrónico de bajo costo para la medición de esta variable y utilizar el modelo propuesto (M2) con buenos niveles de ajuste [10]. Por otra parte, el modelo compuesto por todas las variables (M1) tiene muy altos niveles de ajuste y es útil para ser utilizado en estaciones meteorológicas de bajo costo [11]. Las variables humedad relativa, velocidad del viento y temperatura media no muestran valores de ajuste que nos permitan aceptarlos como modelos propuestos para estimar la evapotranspiración de referencia. Como trabajo futuro se propone generar dispositivos electrónicos de bajo costo capaces de recopilar información de las variables estudiadas para obtener, con estas ecuaciones, estimaciones de evapotranspiración de referencia en un ambiente controlado para continuar con la validación de los modelos propuestos.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] Xiang, K., Li, Y., Horton, R. y Feng, H. (2020). Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration—a review. *Agricultural Water Management*, 232, 106043.
- [2] Thornthwaite, C.W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geog. Rev.* 38, 55–94.
- [3] Liu, Z., Yao, Z. y Wang, R. (2019). Simulation and evaluation of actual evapotranspiration based on inverse hydrological modeling at a basin scale. *Catena* 180, 160–168.
- [4] Paredes, P., Pereira, L. S., Almorox, J. y Darouich, H. (2020). Reference grass evapotranspiration with reduced data sets: Parameterization of the FAO Penman-Monteith temperature approach and the Hargeaves-Samani equation using local climatic variables. *Agricultural Water Management*, 240, 106210.
- [5] Jensen, M.E., Allen, R.G. (2016). *Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, 2nd edition. Reston, Virginia 744p.
- [6] Hämmerly, R. D. C., Paoli, C. y Duarte, O.C. (2018). Distribución de la precipitación y la evapotranspiración en territorio argentino de Cuenca del Plata. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe: Revista de xeoloxía galega e do hercínico peninsular*, 40, 69-102.
- [7] Lang, D., Zheng, J., Shi, J., Liao, F., Ma, X., Wang, W. y Zhang, M. (2017). A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman-Monteith method in southwestern China. *Water*, 9(10), 734.
- [8] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelinse for Computing Crop Water Requirements*. Fao Irrigation and Drainage Paper 56; FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome: Rome, Italy.
- [9] Allen, R. G., Pruitt, W. O., Wright, J. L., Howell, T. A., Ventura, F., Snyder, R. y Elliott, R. (2006). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference  $E_{To}$  by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, 81(1-2), 1-22.
- [10] Verduga-Urdánigo, F., Cevallos-Macías, J. y Solórzano-Cadena, R. (2020). Construcción de un sistema de bajo costo para la medición de rayos ultravioletas basado en internet de las cosas. *Revista científica Multidisciplinaria Arbitrada YACHASUN-ISSN: 2697-3456*, 4(6 Ed. esp.), 73-92.
- [11] Tenzin, S., Siyang, S., Pobkrut, T. y Kerdcharoen, T. (2017). Low cost weather station for climate-smart agriculture. In *2017 9th international conference on knowledge and smart technology (KST)* (pp. 172-177). IEEE.