

Calibración de la ecuación de Hargreaves para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) en Salto, Uruguay

Pamela Texeira¹, Alejandro Pannunzio¹, Javier Brenner¹

¹Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Autor para correspondencia: Pamela Texeira, texeira@agro.uba.ar

(Recibido: 02-06-2021. Publicado: 24-06-2021.)

Resumen

A nivel mundial la agricultura es el principal consumidor de agua con más del 70 % del uso, utilizándola con una eficiencia de alrededor del 40 %. La disminución del agua disponible para la agricultura requiere que se incremente la eficiencia de uso. Una forma de incrementar esta eficiencia es cuantificar de forma precisa las necesidades hídricas de los cultivos para una adecuada gestión del riego. Las necesidades hídricas pueden estimarse a partir del valor de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). Entre los métodos existentes para el cálculo de la ET_o, la ecuación de FAO 56 Penman - Monteith (PM-FAO56) es la recomendada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Sin embargo, esta ecuación requiere una gran cantidad de información que muchas veces no está disponible para el productor agrícola. Existen otros métodos, como el propuesto por Hargreaves, que requieren datos que se encuentran más fácilmente disponibles. Para contribuir a la gestión del agua es importante disponer de ecuaciones que requieran poca información para obtener estimaciones precisas de ET_o. El objetivo general de este trabajo es calibrar la ecuación de Hargreaves para la localidad de Salto, Uruguay. La metodología consistió en comparar los métodos de PM-FAO56 y Hargreaves-Samani, y calibrar para una estación meteorológica la ecuación de Hargreaves - Samani por medio del coeficiente Kt de la ecuación y del exponente, utilizando como valor de referencia la ET_o obtenida de PM-FAO56. Se encontró una buena correlación entre los métodos de PM-FAO56 y Hargreaves. Se concluye que el modelo Hargreaves con el coeficiente Kt modificado a 0,15 y el exponente a 0,494 es una metodología adecuada para la zona de influencia de la estación meteorológica de Salto - Uruguay.

Palabras clave: Necesidades hídricas, eficiencia, riego, gestión.

Abstract

At the global level, agriculture is the main consumer of water with more than 70 % of the use, using it with an efficiency of around 40 %. The decrease in the water available for agriculture requires that the efficiency of use be increased. One way to increase this efficiency is to accurately quantify the water needs of crops for proper irrigation management. Water needs can be estimated from the reference crop evapotranspiration value (ET_o). Among the existing methods for calculating ET_o, the FAO 56 Penman -

Monteith equation (PM-FAO56) is the one recommended by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). However, this equation requires a large amount of information that is often not available to the agricultural producer. There are other methods, such as the one proposed by Hargreaves, that require data that are more readily available. To contribute to water management, it is important to have equations that require little information to obtain accurate estimates of ETo. The general objective of this work is to calibrate the Hargreaves equation for the town of Salto, Uruguay. The methodology consisted of comparing the PM-FAO56 and Hargreaves-Samani methods, and calibrating the Hargreaves - Samani equation for a meteorological station by means of the Kt coefficient of the equation and the exponent, using the ETo obtained from PM as a reference value. -FAO56. A good correlation was found between the PM-FAO56 and Hargreaves methods. It is concluded that the Hargreaves model with the Kt coefficient modified to 0.15 and the exponent to 0.494 is an adequate methodology for the area of influence of the Salto - Uruguay meteorological station.

Keywords: *Water needs, efficiency, irrigation, management.*

1. Introducción

El agua es un recurso multifuncional y escaso, la competencia generada por los diferentes usuarios, plantea la necesidad de planificar de manera integral su uso para el desarrollo sostenible. El riego es el principal consumidor de agua a nivel mundial con más del 70 % del uso, utilizándola con una eficiencia de sólo el 40 %. El riego constituye una herramienta estratégica para enfrentar el problema de la alimentación mundial. La creciente demanda de alimentos y el deterioro del recurso hídrico obligan a la sociedad a realizar un uso más eficiente del mismo. Para un uso sostenible del agua para riego es indispensable conocer los requerimientos hídricos de los cultivos. El conocimiento de las necesidades hídricas de un cultivo ofrece una herramienta valiosa desde la etapa de planificación, permitiendo dimensionar un sistema de riego al determinar cantidad y momentos de aplicación del mismo, así como influir en la economía y conservación de los recursos agua y suelo que muchas veces se dejan de lado en estos sistemas productivos. Los requerimientos hídricos también son importantes para el manejo del riego. Para la adecuada gestión del agua para riego es necesario contar con información climatológica de libre acceso, este es uno de los mayores problemas de Argentina. Uruguay cuenta con bases de datos de libre y fácil acceso, por este motivo se trabajó con datos de la estación del Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA) de Salto, Uruguay, debido que se encuentra a sólo 5 kilómetros de la localidad de Concordia de la provincia de Entre Ríos en Argentina, esto permite suplir la falta de información de la localidad argentina. Actualmente, en Argentina hay una deficiencia en conocimientos básicos sobre las necesidades de los cultivos (Texeira Soria et al., 2013). En la provincia de Buenos Aires existen problemas de gobernanza y gobernabilidad que dificultan el abordaje de la gestión del agua para riego en la misma, además hay un alto desconocimiento por parte de los productores sobre la eficiencia con la que riegan (Texeira Soria, 2014).

Los requerimientos hídricos de los cultivos incluyen el agua evaporada desde la superficie libre del suelo y la transpirada por la planta; en la práctica es difícil su separación, por eso se habla del término evapotranspiración (ET) (Castañón, 2000). La ET se mide en mm.día⁻¹ y depende del clima, de las características del suelo, del manejo y del propio cultivo. La problemática de la estimación de la ET es que depende de varios factores y además es variable en el espacio y el tiempo. Debido a la gran dificultad que existe en la medición directa de la ET, se desarrollaron distintos métodos para estimarla. La estimación a partir de estos métodos se basa principalmente en el balance hidrológico superficial o en el balance energético superficial. Los métodos para la estimación pueden dividirse en directos, teóricos y empíricos. Los métodos directos estiman la ET a través del control de las entradas y salidas de agua en el suelo, como es el caso de los lisímetros donde el resultado estimado será la evapotranspiración del cultivo (ETc). Un

lisímetro diseñado apropiadamente y operado correctamente constituye uno de los métodos más precisos para determinar la ET (Slatyer & McIlroy, 1961; Khan & Acosta, 1998). Los métodos teóricos consideran a la ET como un elemento que forma parte del balance de energía y su papel es la transferencia de masa de vapor de agua entre la Tierra y la atmósfera. Los más ampliamente utilizados son conocidos como de Balance Hídrico y Balance Energético. Dentro de los métodos empíricos, hay numerosos modelos que permiten estimar la evapotranspiración de referencia (E_{To}) mediante la medición de distintas variables meteorológicas. Existen ecuaciones aerodinámicas, de balance de energía, combinadas como Penman (Penman, 1948), Penman - Monteith (Allen et al., 2006); basados en la radiación (Jensen & Haise, 1963); FAO (Doorenbos & Pruitt, 1975) y Turk (1954), basados en la medición de la evaporación como Grassi-Christiansen (Grassi, 1964); Norero (1976); procedimientos basados en datos climáticos, como Blaney - Criddle (1950); y Hargreaves y Samani (1985). A nivel de campo estos métodos otorgan estimaciones razonables de los requerimientos hídricos de los cultivos, aunque en circunstancias específicas poseen ventajas y desventajas.

Un panel de expertos convocado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en 1990, recomendó revisar los procedimientos de cálculo, ya que se encontró que la ecuación de Penman adoptada por FAO en 1975 frecuentemente sobreestimaba dicho valor (Allen et al., 1994). Algunas investigaciones planteaban que esa sobreestimación estaba asociada a errores en el cálculo de la función viento, en el déficit de tensión de vapor y en el cálculo de la radiación neta de onda larga. Por este motivo FAO modificó la ecuación de Penman - Monteith (PM-FAO56) y actualmente este constituye el modelo más aceptado por la comunidad científica (Lopez-Urrea et al., 2006), permitiendo eliminar la necesidad de utilizar otros métodos para la estimación de la ET y creando una base consistente y transparente para una estandarización universal de los cálculos de los requerimientos de agua de los cultivos. La mayor limitación para el uso del método de PM-FAO56 está dada por la cantidad de datos que necesita, muchas veces esta información no está disponible. Por esto es necesario utilizar métodos que permitan estimar la evapotranspiración de manera más simple. En este sentido el método de Hargreaves se presenta como una buena alternativa por la menor cantidad de datos que necesita y la simplicidad de su cálculo. El método de Hargreaves presenta la ventaja de que se puede aplicar sólo con datos de temperatura. Almorox et al. (2008) encontraron que en Uruguay el método de Hargreaves tiene una buena correlación con el de PM-FAO56. Este mismo resultado se encontró en 56.000 estaciones de todo el mundo (Droogers y Allen, 2002). En Argentina, Almorox et al. (2012) también encontraron una buena correlación entre ambos métodos. El objetivo de la investigación fue calibrar la ecuación de Hargreaves y comparar las estimaciones de las evapotranspiraciones de referencia usando Penman - Monteith y Hargreaves - Samani para el uso en zonas que sólo disponen de datos de temperaturas.

2. Metodología

Se utilizaron datos de la estación meteorológica del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) del departamento de Salto, Uruguay. Esta estación se encuentra en $31^{\circ} 16' S$, $57^{\circ} 53' W$ y está a una altura de 50 m.s.n.m. El clima es templado - cálido, de acuerdo con Köppen y Geiger (1930 - 1943) clima se clasifica como Cfa, la temperatura promedio es de $19^{\circ} C$ y la precipitación promedio de 1.352 mm. Se utilizaron datos de diarios registrados durante el periodo comprendido entre el 1° de enero de 1988 al 31 de diciembre de 2019. Los valores de E_{To} por PM-FAO56 fueron obtenidos directamente de la estación del INIA. Para el cálculo de la E_{To} por Hargreaves se utilizaron la temperatura media, la temperatura máxima y la temperatura mínima.

La metodología consistió en calibrar para la estación meteorológica de Salto del INIA la ecuación de Hargreaves por medio del coeficiente de ajuste Kt , utilizando como valor de referencia la ET_o obtenida por PM-FAO56. El coeficiente Kt inicialmente, fue fijado en 0,17 para regiones semiáridas (Salt Lake City, Utah), posteriormente, Hargreaves (1994) recomendó el uso de 0,16 para regiones interiores y 0,17 para las zonas costeras.

El modelo Hargreaves se desarrolló combinando la ecuación original de Hargreaves (Ec. 1) para la estimación de la radiación solar con la ecuación desarrollada por Hargreaves y Samani (Allen y otros, 1998) (Ec. 2).

$$ET_o = kg \cdot R_s \cdot (t_m + 17,8) \quad (1)$$

$$R_s = Kt \cdot Ra(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0,5} \quad (2)$$

Donde:

ET_o = evapotranspiración de referencia (mm/día).

R_s = radiación solar (mm/día)

t_m = temperatura media diaria en grados Celsius ($^{\circ}C$)

R_a = radiación solar extraterrestre se estima a partir de la latitud (MJ)

$T_{m\acute{a}x}$ = temperatura máxima diaria ($^{\circ}C$)

$T_{m\acute{i}n}$ = temperatura mínima diaria ($^{\circ}C$)

Kt = coeficiente de ajuste

kg = constante del modelo para pasar de flujo de energía en MJ a flujo de masa de vapor de agua expresado en mm/día (0,408)

Mediante las ecuaciones 1 y 2, se obtuvieron los valores de ET_o para coeficientes de ajuste (Kt) de 0,16 y 0,15. Estos resultados se compararon con obtenidos por PM-FAO56, que se considera como el de referencia. La comparación se realizó con valores diarios de ET_o ; y siguiendo los criterios de Hargreaves y Allen (2003) también se agruparon los datos en períodos cinco días. Para el cálculo de la ET_o de Hargreaves con el coeficiente Kt de 0,15, también se modificó el exponente a 0,494.

Se realizó el análisis estadístico con el programa Infostat (Di Rienzo et al., 2012). Los estadísticos utilizados para medir la eficiencia de los modelos desarrollados fueron los siguientes (Willmott, 1982): el coeficiente de determinación, R^2 (Ec. 3); el error cuadrático medio, RMSE (mm/día) (Ec. 4); el error de medio absoluto, MBE (mm/día) (Ec. 5) y el error relativo (RE) (Ec. 6). Se utilizó la regresión lineal simple ($y = b_0 + b_1 x$), entre los valores diarios de ET_o estimados por Hargreaves y medidos (ET_o PM-FAO-56), donde la variable dependiente y , correspondió a los valores medidos y los valores estimados fueron considerados como la variable independiente x .

$$R^2 = \frac{a^2 xy}{a^2 x \sigma^2 y} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum n_{t-1} \frac{(y1 - x1)^2}{n}} \quad (4)$$

$$MBE = \frac{\sum n_{t-1}(y1 - x1)}{n} \quad (5)$$

$$RE = \frac{MBE}{\sigma} \quad (6)$$

Donde:

n = es el número de datos

y = es el valor esperado de ETo por Hargreaves – Samani

x = es el valor observado de ETo por PM-FAO56

σ_{xy} = es la covarianza de x e y

σ_x = es la desviación típica de x

σ_y = es la desviación típica de y

R^2 = es una medida estadística de cuán bueno es el ajuste de la línea de regresión entre las dos variables.

3. Resultados

En la tabla 1 se observan los resultados de la comparación entre la ETPM y la ETo de Hargreaves con el coeficiente de ajuste K_t de 0,16 que fue recomendado por Hargreaves para regiones interiores. En la primera fila se indican los resultados de la comparación diaria de la ETo. El análisis de la varianza muestra, con un nivel de confianza del 95 %, un p-valor menor a 0,0001, que existe una relación lineal significativa entre la ETo de Hargreaves y la ETPM. El análisis de regresión realizado a partir de las dos fórmulas permitió obtener un valor de R^2 igual a 0,83. El RMSE es de 0,90 mm/día, este valor indica un mal desempeño de Hargreaves con valores diarios, cuanto menor es el valor de RMSE mejor es la bondad del modelo, el óptimo es 0. El valor de MBE es negativo lo que está indicando una subestimación de 0,30 mm/día, del modelo de Hargreaves. En este punto hay que considerar que la desventaja de los estadísticos MBE es que los errores de signos diferentes pueden compensar errores en la suma y unos pocos valores en la suma pueden producir un aumento significativo en el valor. En la segunda fila de la tabla 1 se muestran los estadísticos correspondientes a la comparación de la ET en grupos de cinco días. Se observa que todos los estadísticos muestran una mayor concordancia del modelo, siendo el R^2 de 0,91, indicando una mejor relación entre las variables para la comparación en grupos de cinco días. El RMSE fue de 0,67 mm/día. En ambos casos el error relativo es elevado. Los mejores resultados obtenidos cuando la ETo se agrupan cada cinco días se da porque se atenúa la diferencia diaria de la temperatura debido a los frentes de condiciones de lluvia, velocidad del viento y cobertura de nubes.

Tabla 1: Comparación entre los promedios de evapotranspiración estimados por Hargreaves - Samani versus estimados mediante el modelo PM-FAO56 para periodos diario y de cinco días para coeficiente de ajuste Kt de 0,16.

	n	ETPM- FAO56	ET H	R ²	RMS E	MB E	RE	b1	b2	P
ET _o diaria	11.69	3,30	3,61	0,83	0,90	-0,30	10,63 %	-0,70	1,11	0,0001
ET _o cada 5 días	2.338	3,30	3,61	0,91	0,67	-0,32	-18,43 %	-0,70	1,13	0,0001

En la tabla 2 se observan los estadísticos correspondientes a la ETPM y Hargreaves con Kt 0,15. Para la zona de estudios los resultados muestran una mejora en todos los estadísticos en la estimación de la ET por Hargreaves al modificar el coeficiente Kt a 0,15. Los mejores resultados, al igual que en el caso anterior, se obtienen con la ET agrupada cada cinco días.

Tabla 2: Comparación entre los promedios de evapotranspiración estimados por Hargreaves - Samani versus estimados mediante el modelo PM-FAO56 para periodos diario y de cinco días para coeficiente de ajuste Kt de 0,15 y exponente 0,494.

	n	ETPM- FAO56	ET H	R ²	RMS E	MB E	RE	b1	b2	P
ET _o diaria	11.69	3,30	3,33	0,84	0,88	-0,3	-2,02 %	-0,71	1,20	0,0001
ET _o cada 5 días	2.338	3,30	3,33	0,91	0,65	-0,03	-4,97 %	-0,78	1,23	0,0001

En la figura 1 puede observarse el gráfico de dispersión con bandas de confianza y de predicción obtenido a partir de los valores existentes. Asimismo, en la figura 2 puede observarse la marcha cada cinco días de la ET_o para el periodo 1988 al 2019 para los métodos de Penman – Monteith y Hargreaves – Samani calibrado; se manifiesta una buena concordancia entre ambos modelos.

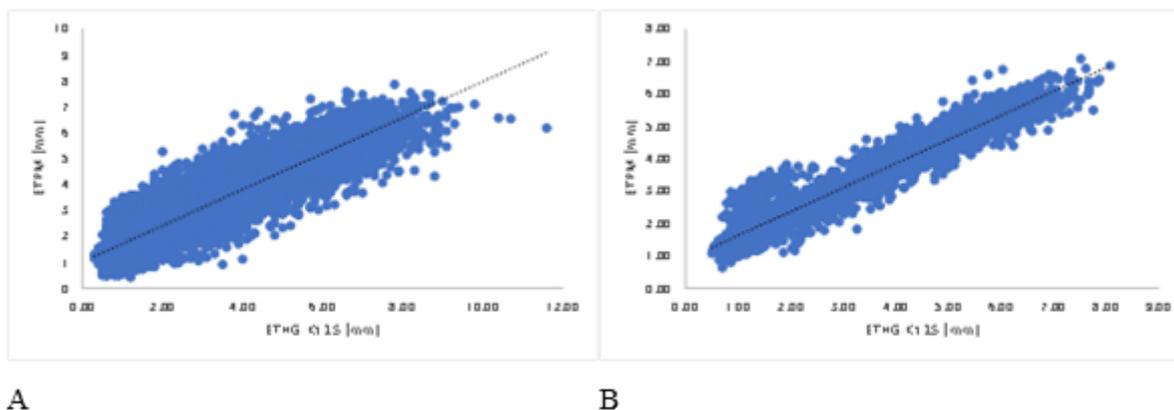


Figura 1: Método de Hargreaves (ETHG Kt 0,15) calibrado frente a Penman – Monteith (ETPM). Comparación diaria (A) y en grupos de 5 días (B).

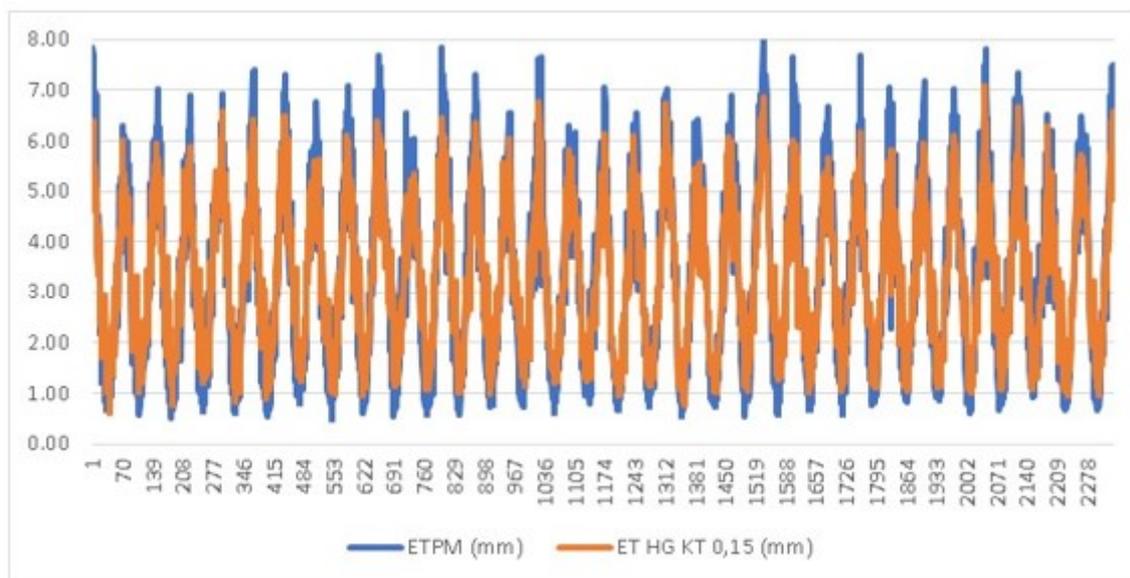


Figura 2: Comparación de la evolución de la ETo, cada cinco días, para el modelo de Penman – Monteith (ETPM) y para Hargreaves – Samani calibrado (ET HG Kt 0,15).

n: número de datos

ETPM-FAO56: ET promedio calculada con PM-FAO56 (mm/día)

ETH: ET promedio calculada con Hargreaves – Samani (mm/día)

R2: coeficiente de determinación

RMSE: raíz cuadrada del error cuadrático medio (mm/día) (mm/día)

MBE: error de sesgo medio (mm/día) (mm/día)

4. Conclusiones

El coeficiente Kt y el exponente de la ecuación calibrada son de 0,15 y 0,494 respectivamente, ambos valores son menores a los recomendados originalmente por Hargreaves. Los resultados indican que existe una relación lineal significativa entre la evapotranspiración calculada con el método de Hargreaves – Samani calibrado y el de Penman – Monteith. La mayor concordancia se obtuvo al comparar los valores de evapotranspiración agrupados cada cinco días. El método de Hargreaves – Samani calibrado resulta adecuado para la ETo en la zona de influencia de la estación meteorológica de Salto Uruguay. Es importante continuar con la calibración del método de Hargreaves – Samani para distintas regiones, debido al gran aporte que puede hacer para la gestión del agua para riego.

Referencias bibliográficas

Allen RG, Hill RW, Srikanth V (1994): Evapotranspiration parameters for variably-sized wetlands. *American Society of Agricultural Engineers. Meeting (USA)*, 94: 2120-2155.

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (2006): Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO 56.

Almorox J, Hontoria C, Benito M (2008): Comparación de algunos métodos de estimación de la evapotranspiración en Uruguay. *Revista Ingeniería Química*, 33: 5-9.

Almorox J, Elisei V, Commegna M (2012): Calibración del modelo de Hargreaves para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Coronel Dorrego, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Cuyo*, 44(1): 101-109.

Blaney HF, Criddle WD (1950): Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. U.S. Soil Conservation Service.

Castañón G (2000): Ingeniería del riego: utilización racional del agua. Paraninfo.

Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW (2012): InfoStat versión 2020. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Doorenbos J, Kassam A (1979): Efectos del Agua sobre el Rendimiento de los Cultivos. Estudio FAO.33.

Droogers P, Allen RG (2002): Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 16(1), 33-45.

Grassi CJ (1964): Estimation of evapotranspiration from climatic formulas. Tesis (Mag Sc) Utah State Univ.

Hargreaves GH, Samani ZA (1985): Reference crop evapotranspiration from temperature, *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.

Hargreaves GH (1994): Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe. Utah State University.

Hargreaves GH, Allen RA (2003): History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 129(1): 53-63.

Jensen ME, Haise HR (1963): Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage*, 89:15-41.

Khan L, Gil J, Acosta R (1998): Diseño y funcionamiento de un lisímetro hidráulico para medición de la evapotranspiración potencial. *Bioagro*, 10(1), 11-17.

Köppen W, Geiger R (1930-1943): Manual de la climatología en cinco volúmenes. Editorial Gebrüder Borntraeger.

Lopez-Urrea R, de Santa Olalla FM, Fabeiro C, Moratalla A (2006): An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. *Agricultural Water Management*,

86(3), 277-282.

Norero A (1976): Evaporación y transpiración. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras.

Penman HL (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120-145. Slatyer, RO and McIlroy, IC. (1961): Practical microclimatology, with special reference to the water factor in soil-plant atmosphere relationships. *Agricultural Meteorology*, 2:55-66.

Texeira Soria P, Pannunzio A, Borello L (2013): Impacto del fenómeno .El Niño - Oscilación del Sur” sobre la evapotranspiración de la localidad de San Pedro, Buenos Aires, Argentina, para el periodo 2005-2011. *Rev. Climatol.*, (13): 27-34.

Turk L (1954): Le bilad'eau des sols: relations entre les precipitation l'evaporation et l'ecoulement. *Annales Agronomiques*, (4):491-595.

Willmott CJ (1982): Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11):1309-1313.