

## EVAPOTRANSPIRACIÓN REFERENCIAL (ET<sub>o</sub>) MEDIDA VS. ESTIMADA EN TARABANA (10° 01' LN), ESTADO LARA, VENEZUELA\*

Measured vs. estimated reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) in Tarabana (10° 01' North), Lara State, Venezuela

Reinaldo Pire<sup>1</sup> y Rafael Rodríguez<sup>1</sup>

### RESUMEN

Entre los aspectos relevantes en la planificación de los desarrollos agrícolas se encuentra la determinación de las necesidades de riego de los cultivos. Una de las formas de lograr este objetivo se basa en el conocimiento de la evapotranspiración referencial (ET<sub>o</sub>) de una determinada zona. En este estudio se midió la ET<sub>o</sub> en Tarabana, estado Lara, mediante el empleo de lisímetros de pesada en los que se utilizó grama San Agustín, *Stenotaphrum secundatum* (Walter) Kunze, como cultivo referencial. Se llevaron registros diarios o interdiarios de los pesos de los lisímetros y la diferencia de los pesos entre dos períodos consecutivos representó la evapotranspiración real ocurrida en ese período. La ET<sub>o</sub> obtenida se comparó con la calculada mediante los principales métodos de estimación conocidos para obtener la ecuación de mejor ajuste. Se obtuvo que la mayor ET<sub>o</sub> ocurrió en el mes de abril (5,50 mm/d) y la menor en enero (4,10 mm/d). La ecuación de Penman-Monteith reprodujo mejor los valores de ET<sub>o</sub>. Se encontró un coeficiente de tina promedio de 0,79; el cual pudiera ser utilizado para estimar la ET<sub>o</sub> en otras localidades con características climáticas similares.

**Palabras clave:** lisímetro, ecuación de Penman-Monteith, coeficiente de tina, riego.

### ABSTRACT

Among the relevant aspects in the planning of agricultural developments is the determination of crop water needs. One way to achieve this goal is based on knowledge of the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) in a given area. In this study we measured the ET<sub>o</sub> in Tarabana, Lara State, Venezuela, through the use of weighing lysimeters where St. Augustine grass, *Stenotaphrum secundatum* (Walter) Kunze, was used as the reference crop. Measurements of the lysimeter weights were taken, daily or each other day, and the difference between two consecutive records represented the actual evapotranspiration occurred in that period. The measured

---

(\*) Recibido: 15-02-2008

Aceptado: 06-05-2008

(1) UCLA, Decanato de Agronomía. Apartado 400. Barquisimeto, Venezuela. email: rpire@ucla.edu.ve.

ETo was compared with that estimated by some predictive formulas to obtain the best fitting equation. The highest ETo was found in April (5.50 mm/d) and the lowest in January (4.10 mm/d). The Penman-Monteith equation was the one that best reproduced the ETo values. It was found a mean pan coefficient of 0.79 which could be used to estimate the ETo in other localities with comparative climatic characteristics.

**Key words:** lysimeter, Penman-Monteith equation, pan coefficient, irrigation.

---

## INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de riego producto de la expansión de las áreas cultivadas unido a la cada vez menor disponibilidad del líquido que se origina por el incremento de las zonas urbanas de los alrededores, trae como consecuencia la necesidad de determinar con precisión los volúmenes de agua de riego requeridos por los cultivos.

Para determinar las necesidades de riego en una determinada zona es necesario conocer la evapotranspiración referencial (ETo), la cual representa la base fundamental de este cálculo (Allen *et al.* 1997). Aunque no es fácil obtener un valor exacto de este parámetro, existen métodos basados en datos climatológicos que pueden ser utilizados para tal fin. Penman (1948) determinó que la evapotranspiración varía en función de la radiación, temperatura, humedad ambiental y viento. Sin embargo, el grado de asociación con estos elementos del clima debe ser determinado para cada región (Paw *et al.* 2004).

La ETo puede medirse directamente mediante el empleo de los ins-

trumentos conocidos como lisímetros o estimarse mediante el empleo de las ecuaciones de estimación que han sido desarrolladas para este fin en diferentes partes del mundo y cuya aplicación está basada en los datos meteorológicos de cada zona en particular (Allen *et al.* 1998). Una alternativa importante para estimar la ETo se basa en las mediciones de evaporación en una tina estándar tipo A. La evaporación está influida fundamentalmente por los mismos elementos del clima que afectan la ETo, por lo cual se ha encontrado una alta correlación entre ambos valores en diferentes partes del mundo. Adicionalmente, la tina es un instrumento económico y de fácil instalación.

Una vez que se dispone de los diferentes datos climáticos que participan en las ecuaciones de estimación, es necesario medir directamente la ETo verdadera de la zona en referencia. De esta forma se pueden obtener relaciones entre la ETo estimada y la medida que posibiliten la selección de las ecuaciones empíricas de mejor ajuste (Doorenbos y Pruitt 1977, Tarantino 1991, Chiew *et al.* 1995).

Los lisímetros permiten medir directamente a ETo verdadera (Aboukhaled *et al.* 1982, De Graaf *et al.* 2004). Son recipientes que se llenan de suelo y se siembran con cultivos como grama o pasto con el fin de medir la evapotranspiración en un intervalo de tiempo determinado. Entre los lisímetros más comunes están los lisímetros de pesada que miden gravimétricamente la ETo (Pereira *et al.* 1996). La evapotranspiración de la grama San Agustín puede ser considerada como la ETo de una determinada zona ya que es un cultivo de crecimiento uniforme que cubre totalmente la superficie del suelo (Allen *et al.* 1998).

La presente investigación tuvo el objetivo de medir la ETo en la zona de Tarabana, estado Lara, mediante el uso de lisímetros de pesada y seleccionar la ecuación empírica de mejor ajuste para su estimación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la estación experimental del Decanato de Agronomía de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA) en Tarabana, municipio Palavecino del estado Lara (510 msnm), en un área adyacente a la estación climática de la Institución.

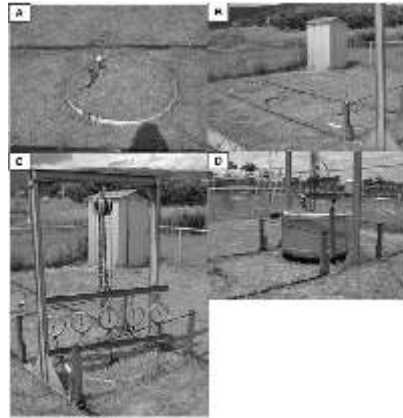
En el año 2000 se conformaron tres lisímetros de pesada de aproximadamente 800 kg de capacidad cada uno, con un área circular de un metro de diámetro (área de 0,76 m<sup>2</sup>) y 60 cm de profundidad, consistentes en

tanques de fibra de vidrio de 500 l de capacidad. Para la instalación se cavaron fosas de dimensiones ligeramente superiores a la de los tanques, y cuyas paredes fueron revestidas con cilindros de lámina metálica calibre 18. Cada uno de estos recipientes fue colocado dentro de la fosa de manera que su parte superior estaba a nivel de la superficie del suelo y el conjunto quedó colocado transversalmente a la dirección predominante del viento. Cada tanque estuvo colocado dentro de una estructura metálica en forma de cesta que permitía levantarlo desde el suelo. Los lisímetros así conformados se llenaron con una mezcla a partes iguales de la misma tierra extraída de la excavación y de un suelo orgánico para formar un substrato de densidad aparente de 1,10 y alta permeabilidad. En el fondo de los recipientes se colocó una llave de paso para permitir el drenaje del exceso de agua cuando fuese necesario. Posteriormente se plantó grama San Agustín (*Stenotaphrum secundatum*), la cual cubría toda la superficie del lisímetro y fue mantenida con una altura de aproximadamente 10 cm. En cada lisímetro se colocó un tensiómetro a 15 cm de profundidad y la aplicación del riego se realizó cuando el promedio de lecturas de los tensiómetros era de aproximadamente 20 centibares, con el objeto de mantener un nivel alto de humedad en el suelo sin llegar a producir saturación.

Se tomó el peso de los lisímetros en las primeras horas de la

mañana, en períodos diarios o interdiarios, durante doce meses consecutivos, lo que permitió registrar 256 lecturas que representaron el 70 % del total de los días del año. Cuando correspondió aplicar el riego, las pesadas se realizaron inmediatamente antes y después de éste. La diferencia de los pesos entre dos mediciones consecutivas representó la evapotranspiración real ocurrida en ese período o ETo de la zona. El efecto de la lluvia, cuya magnitud fue medida directamente en el sitio, fue incluido al adicionar su valor a la ETo obtenida en los lisímetros en el período considerado. Es de destacar que en los días que ocurrieron precipitaciones fuertes, aparentemente la intensidad de la lluvia superó a la tasa de infiltración del suelo, ocasionó derrames de agua y lecturas irregulares en los lisímetros; en ese caso, dichas lecturas fueron eliminadas.

El procedimiento de pesada se realizaba utilizando cinco pesos mecánicos de reloj de 200 kg de capacidad cada uno, colocados en paralelo, de forma que el conjunto totalizaba una capacidad de 1000 kg. Este conjunto podía ser levantado utilizando un elevador portátil de engranaje y cadena sostenido por una viga doble-T colocada en un pedestal de 1,80 m de altura (Figura 1 A, B, C, D). El pedestal podía desplazarse mediante rieles para colocarlo justo encima de cada lisímetro al momento de realizar los pesajes.



**Figura 1. A. Lisímetro con sus tensiómetros. B. Los tres lisímetros en línea y rieles del soporte. C. Conexión con los pesos de reloj y mecanismo de levante. D. Lisímetro extraído totalmente para mantenimiento.**

El área alrededor de los lisímetros se mantuvo con grama bien regada y en activo crecimiento. Así mismo, en un área extensa en la dirección de los vientos predominantes (lado barlovento) se mantuvo, continuamente la presencia cultivos de porte bajo ó vegetación natural consistente en pequeños arbustos y malezas.

Una vez transcurridos 12 meses consecutivos de mediciones diarias se totalizó la ETo ocurrida en forma mensual. Por otra parte, a partir de los datos de radiación solar, horas de sol, temperatura, humedad relativa y recorrido del viento provenientes de una estación meteorológica automatizada Monitor Sensors (Pennant Hills, Australia), se estimó la ETo empleando ecuaciones empíricas conocidas (Tabla 1). Las mismas fueron seleccionadas de un grupo mayor en función de que en un ensayo preliminar habían mostrado

**Tabla 1. Métodos empíricos utilizados en este ensayo para estimar la evapotranspiración referencial (ET<sub>o</sub>).**

Método	Autor(es)	Elementos climáticos
Blaney-Criddle (FAO)	Blaney-Criddle (1950)	Temperatura
Makkink	Makkink (1957)	Radiación y temperatura
García-López	García-López (1970)	Temperatura y humedad
Penman (FAO)	Doorenbos y Pruitt (1977)	Radiación, temperatura,
Penman-Monteith	Allen <i>et al.</i> (1997)	humedad y viento
Tina de evaporación	Doorenbos y Pruitt (1977)	Evaporación

correlaciones significativas con la ET<sub>o</sub> (Pire *et al.* 1998). Estas ecuaciones tienen la particularidad de que utilizan diferentes elementos del clima y han sido extensamente utilizadas, o han sido desarrolladas en las condiciones del trópico.

La ET<sub>o</sub> medida en los lisímetros se comparó mediante análisis de regresión lineal con la ET<sub>o</sub> estimada utilizando las ecuaciones empíricas con el fin de conseguir la ecuación de mejor ajuste para la zona. Asimismo, se estableció mediante análisis de regresión la relación matemática entre la evapotranspiración medida en los lisímetros y la evaporación en una tina tipo A para obtener los coeficientes de tina (K<sub>p</sub>) correspondientes a cada mes. La variabilidad de los resultados entre los lisímetros se representó por su desviación estándar.

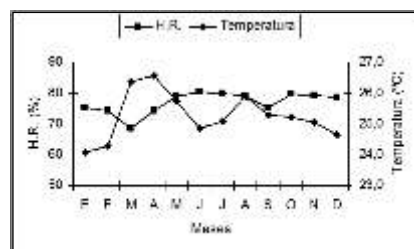
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de la evapotranspiración de la grama o ET<sub>o</sub> fueron agrupados mes a mes (Tabla 2). Se observa que el mayor valor (5,3 mm/día) ocurrió en el mes de abril cuando se produjo el mayor valor de la temperatura media y el mayor recorrido del viento (Figuras 2 y 3). Por otra parte, el menor valor de ET<sub>o</sub>,

ocurrido en el mes de enero (4,1 mm/día), coincidió con los menores valores de radiación, temperatura y viento de todo el año (Figuras 2 y 3). En un trabajo previo, Majano *et al.* (1995) encontraron que el recorrido nocturno del viento era un factor importante que afectaba la evaporación del agua.

**Tabla 2. Evapotranspiración mensual de la grama San Agustín (ET<sub>o</sub>) durante 12 meses consecutivos (media ± desviación estándar).**

Mes	ET <sub>o</sub> (mm/d)	Nº de lecturas
Enero	4,1 ± 0,37	24
Febrero	4,4 ± 0,62	22
Marzo	4,7 ± 0,57	23
Abril	5,3 ± 0,39	23
Mayo	4,8 ± 0,61	20
Junio	4,2 ± 0,47	20
Julio	4,5 ± 0,52	18
Agosto	4,6 ± 0,60	19
Septiembre	4,7 ± 0,59	21
Octubre	4,6 ± 0,24	23
Noviembre	4,4 ± 0,51	21
Diciembre	4,2 ± 0,39	22

**Figura 2. Variación de la humedad y temperatura del aire durante los 12 meses de mediciones lisimétricas, en la zona de Tarabana, estado Lara.**

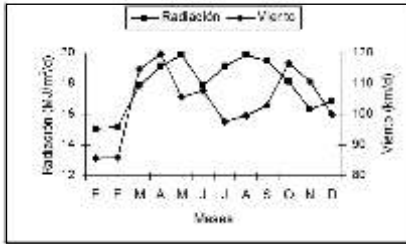


Figura 3. Variación de la radiación incidente y recorrido del viento durante los 12 meses de mediciones lisimétricas, en la zona de Tarabana, estado Lara.

Durante el mes de septiembre se produjo un segundo pico de ETo pero de menor magnitud que el ocurrido en abril (Tabla 2). En este caso sólo se observó cierta coincidencia con valores moderadamente altos de radiación.

En la Tabla 3 se muestra la relación porcentual y el error estándar de la estimación para la regresión lineal entre la ETo medida y la ET calculada a partir de las ecuaciones mencionadas. Se observa que la ecuación de Blaney-Criddle presentó un error estándar de magnitud moderada (0,29 mm/día) y sobrestimó en 27 % los valores reales de la ETo. Las ecuaciones de Makkink y de García-López tuvieron un comportamiento recíproco en cuanto a la exactitud (sobrestimaron la ETo en 19 y 23 %) y el error estándar (0,41 y 0,36 mm/día, respectivamente). La

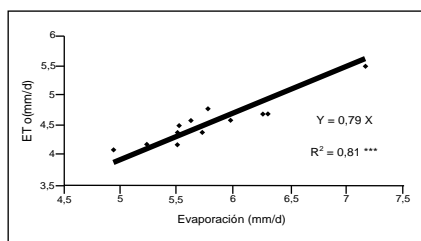
ecuación de Penman-Monteith fue la única que subestimó la ETo (4 % por debajo del valor real), pero al mismo tiempo se aproximó mejor a los valores reales y presentó el menor error estándar de la estimación (0,25 mm/día). Así mismo, mejoró los resultados obtenidos con la ecuación Penman-FAO tanto en su exactitud como en el error estándar. Resultados similares fueron reportados por Ortega-Farías *et al.* (2004), quienes encontraron muy buena predicción al utilizar la ecuación de Penman-Monteith y señalaron que la ecuación de Makkink sobrestimó los valores reales de ETo. La ecuación de Penman-Monteith ha sido reportada en otras oportunidades como la que mejor reproduce los valores de evapotranspiración referencial bajo diversas condiciones climáticas (Allen *et al.* 1997, Al-Ghobari 2000, García *et al.* 2004). Por otra parte, Doorenbos y Pruitt (1977) señalaron que la falta de exactitud en la estimación de la ETo puede alcanzar un máximo de 10 % cuando se utiliza el método de Penman-FAO, 20 % con el método de Makkink y 25 % con el de Blaney-Criddle. En nuestros cálculos, sólo la ecuación de Blaney-Criddle sobrepasó (aunque ligeramente) el valor máximo antes señalado.

Tabla 3. Relación porcentual y error estándar de la estimación para la regresión lineal entre la ETo medida y ETo calculada según ecuaciones empíricas en la zona de Tarabana, estado Lara.

Ecuación	Estimación de ETo (%)	Error estándar de la estimación (mm/día)
Blaney-Criddle (FAO)	127	0,29
Makkink (FAO)	119	0,41
Penman modificada (FAO)	110	0,27
García y López (Venezuela)	123	0,36
Penman-Monteith (Cranfield Univ., U.K)	96	0,25

Es de destacar que en las adyacencias de los lisímetros, en la dirección de los vientos predominantes, existió normalmente algún tipo de vegetación, la cual puede contribuir a minimizar el efecto de advección, es decir, el transporte horizontal de energía calórica hacia la grama que podría afectar la correlación entre las variables en estudio (Rosenberg 1983, Tolk *et al.* 2007).

Por otra parte, la comparación entre los valores de ETo y la evaporación ocurrida presentó un coeficiente de determinación altamente significativo (Figura 4). La ecuación de regresión mostró que para esta zona la ETo corresponde aproximadamente al 78 % de la evaporación medida en tina tipo A ( $K_p = 0,78$ ) en promedio para todo el año. En tal sentido, Raghuwanshi y Wallender (1998) y Naoum y Tsanis (2003) han mostrado las bondades que ofrece la utilización de la evaporación en tina para estimar la Eto.

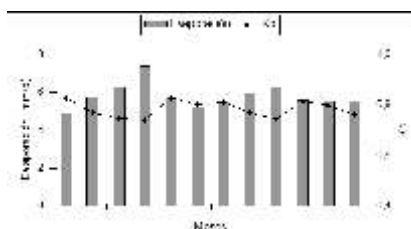


**Figura 4.** Variación de ETo en función de la evaporación ocurrida durante 12 meses consecutivos, en la zona de Tarabana, estado Lara.

\*\*\* Significativo para  $P=0,001$

En la Figura 5 se comparan las tendencias de la magnitud de la

evaporación y del coeficiente de tina y se observa que la variación anual de la evaporación presenta una tendencia inversa al  $K_p$ . Esto pudiera significar que al determinar la ETo a partir de los valores de evaporación, cualquier incremento de la ETo debido a un aumento de la evaporación estaría parcialmente amortiguado por el efecto de un menor  $K_p$ . Por otra parte, al comparar la tendencia del  $K_p$  durante el año se observa cierto comportamiento inverso con las fluctuaciones de la velocidad del viento y directo con la variación de la humedad del aire (Figuras 1 y 2), lo cual coincide con las tendencias del  $K_p$  presentadas por la FAO (Doorenbos y Pruitt 1977).



**Figura 5.** Variación del coeficiente de tina ( $K_p$ ) y evaporación durante 12 meses consecutivos, en la zona de Tarabana, estado Lara.

El  $K_p$  encontrado en esta investigación puede ser de utilidad para estimar la evapotranspiración referencial en otras zonas de características climáticas similares y donde el único registro disponible sea la evaporación. De esta manera, se posibilitaría la determinación de los requerimientos de riego de los cultivos de forma de lograr un uso más eficiente del agua, particular-

mente en el trópico donde la ETo medida mediante lisímetros a intervalos diarios es escasa.

### CONCLUSIONES

La evapotranspiración referencial de la zona varió entre un máximo de 5,50 mm/día en el mes de abril y un mínimo de 4,10 mm/día en el mes de enero.

La ecuación empírica que mejor reprodujo los valores de ETo fue la de Penman-Monteith

Se encontró una alta correlación entre la ETo y la evaporación medida en tina con un Kp promedio de 0,79.

### REFERENCIAS

- Aboukhaled, A., Alfaro, A. and Smith, M. 1982. Lysimeters. Irrigation and Drainage Paper 39. FAO, Roma. 68 p.
- Al-Ghobari, H. 2000. Estimation of reference evapotranspiration for southern region of Saudi Arabia. Irrig. Sci. 19(2):81-86.
- Allen, R.G., Smith, M., Pereira, L.S. and Pruitt, W.O. 1997. Proposed revision to the FAO procedure for estimating crop water requirements. Acta Horticulturae 449:17-33.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage. Paper 56. FAO, Roma. 301 p.
- Blaney, H.F. and Criddle, W.D. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Conservation Service Tech. Paper No. 96. 48p.
- Chiew, F.H., Kamaladasa, N.N., Malano, H.M. and McMahon, T.A. 1995. Penman-Monteith, FAO 24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. Agric. Water Management 28: 9-21.
- De Graaf, R., de Gelder, A. and Block, C. 2004. Advanced weighing equipment for water, crop growth and climate control management. Acta Horticulturae 664: 163-167.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24. FAO, Roma. 144 p.
- García, B., J. y López, J. 1970. Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptada al trópico. Agron. Trop. 20 (5): 335-345.
- García, M., Raes, D., Allen, R. and Herbas, C. 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands. Agric. Forest Meteorol. 125: 67-82.



- Majano, L., Pire, R. y Bastidas, R. 1995. Relación entre la evaporación y algunos elementos del clima en la zona de Altagracia, estado Lara. VII Jornadas de Investigación Agronómica. UCLA. Barquisimeto. p.32.
- Makkink, G. 1957. Testing the Penman formula by lysimeters. J. Int. Water Eng. 11(3):277-288.
- Naoum, S. and Tsanis, I.K. 2003. Hydroinformatics in evapotranspiration estimation. Environ. Model. Software 18: 261-271.
- Ortega-Farías, S., Rojas, V., Valdés, H. and González, P. 2004. Estimation of reference evapotranspiration in the Maule Region of Chile: a comparison between the FAO Penman-Monteith and Bowen Ratio methods. Acta Horticulturae 664: 469-475.
- Paw, K.T., Wharton, S. and Kochendorfer, J. 2004. Evapotranspiration: measuring and modeling. Acta Horticulturae 664: 537-551.
- Penman, H.L. 1948. Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. London. Ser. A. 193: 120-145.
- Pereira, L., Perrier, A., Allen, R. and Galves, I. 1996. Evapotranspiration: review of concepts and future trends. In: C. Camp *et al.* (eds.). Evapotranspiration and Irrigation Scheduling Amer. Soc. Agric. Eng., Madison, Wisconsin. pp. 109-115.
- Pire, R., López, J. y Rodríguez, R. 1998. Evapotranspiración de la gramínea *Stenotaphrum secundatum* en la zona de Tarabana. XLIV Reunión Anual de la Sociedad Interamericana de Horticultura Tropical. UCLA. Sept-Oct. 1998. Barquisimeto. Resumen p.A-2.
- Raghuwanshi, N. and Wallender, W. 1998. Converting from pan evaporation to evapotranspiration. J. Irrig. Drain Engineering (ASCE) 124(5): 275-277.
- Rosenberg, D. 1983. Microclimate. The Biological Environment. Wiley. New York. 495 p.
- Tarantino, E. 1991. Grass reference measurements in Italy. In: R. Allen *et al.* (eds.). Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements. American Society of Civil Engineers (ASCE). N.Y. pp. 200-209.
- Tolk, J., Evett, S. and Howell, T. 2007. Advection influences on evapotranspiration of alfalfa in a semiarid climate. Agron. J. 98:1646-1654.