

ARTÍCULO ORIGINAL

# Estimación de la demanda hídrica del trigo y sorgo en el Estado de México mediante la recalibración de $K_T$

## *Estimation of the water uptake of wheat and sorghum in the State of Mexico by means of the recalibration of $K_T$*

M.C. José Luis Rangel Salinas<sup>1</sup>, Dr. Khalidou Mamadou Bâ<sup>1</sup>, Dr. Henry Arturo Kelso Bucio<sup>II</sup>,  
M.C. Francisco Magaña Hernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Cerro de Coatepec, Toluca, Estado de México, México.

<sup>II</sup> Productos Agropecuarios KEBU, S.A., San Félix, Chiriquí, Panamá.

### RESUMEN

En este estudio se realizó la estimación de la demanda hídrica del trigo y sorgo en el Estado de México mediante la recalibración del coeficiente  $K_T$ , para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>). Debido a que el método recomendado por la FAO es el de Penman-Monteith y a veces las variables necesarias son escasas, la tendencia es usar métodos más simples como el método del Tanque Evaporímetro. Debido a esto, el objetivo de esta investigación se centra en la recalibración del coeficiente  $K_T$  para la estimación de ET<sub>o</sub> y determinar el déficit hídrico del trigo y sorgo de forma espacial para el Estado de México, a través de la implementación de la base de datos meteorológicos de CONAGUA-SMN. La comparación de los métodos fue realizada mediante la desviación estándar del error, índice de correspondencia y el cociente entre ambas estimaciones de ET<sub>o</sub>. Los resultados indican que el déficit hídrico promedio para el cultivo de trigo y sorgo fue de 88 mm y 10 mm, para el periodo mayo-septiembre y mayo-agosto, respectivamente. Además, el método del Tanque Evaporímetro recalibrado mediante su coeficiente  $K_T$ , puede ser utilizado para estimar ET<sub>o</sub> y disminuir la sobreestimación o subestimación del método.

**Palabra clave:** evapotranspiración, evaporación, tanque evaporímetro, requerimientos hídricos.

### ABSTRACT

An estimation was made of the water uptake of wheat and sorghum in the State of Mexico by means of the recalibration of the coefficient  $K_T$ , for the estimation of the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>). Because the method recommended by the FAO is that of Penman-Monteith and at times the necessary variables are scarce, the tendency is to use simpler methods such as the Evaporimeter Tank method. Therefore, the objective of the present study is centered on the recalibration of the coefficient  $K_T$  for the estimation of ET<sub>o</sub> and to spatially determine the water deficit of wheat and sorghum for the State of Mexico, by means of the implementation of the meteorological data base of CONAGUA-SMN. The comparison of the methods was made by means of the standard deviation of the error, correspondence index and the quotient between both estimations of ET<sub>o</sub>. Results indicate that the average water deficit for wheat and sorghum was 88 mm and 10 mm, for the period May-September and May-August, respectively. Furthermore, the Evaporimeter Tank method recalibrated using its  $K_T$  coefficient, may be used to estimate ET<sub>o</sub> and reduce the overestimation or underestimation of the method.

**Keywords:** evapotranspiration, evaporation, evaporimeter tank, water requirements.

### INTRODUCCIÓN

La optimización de los recursos ha alcanzado todos los niveles de la vida humana. En el caso del agua, dicha optimización adquiere gran importancia, ya que la disponibilidad del líquido disminuye cada vez más y por lo tanto su obtención se

dificulta y encarece de manera importante. Debido a la falta o la inapropiada distribución espacio-temporal de la lluvia, es necesario el riego. Esta actividad tiene como objetivo suministrar la cantidad de agua requerida por los cultivos en sus diferentes etapas de crecimiento, una subestimación de los requerimientos

de riego puede generar condiciones de estrés hídrico en los cultivos, afectando la productividad y calidad del mismo.

La evapotranspiración de cultivo (ETc) y la precipitación efectiva (PE) son los dos principales componentes para estimar los requerimientos de riego, mismos que han sido probados y aplicados desde hace varias décadas en México y en el mundo (Ojeda *et al.*, 2007).

El Estado de México está situado entre los meridianos 98°36' y 100°37' de longitud oeste y los paralelos 18°22' y 20°17' de latitud norte, se ubica en la parte Sur de la altiplanicie meridional de la República Mexicana, la altitud en las cabeceras municipales fluctúa entre 1 330 y 2 800 msnm. Políticamente está conformado por 125 municipios con una superficie de 22 351 km<sup>2</sup> y representa el 1,1% del territorio nacional (INEGI, 2012).

Para el desarrollo de programas agropecuario y forestal del gobierno federal utiliza la regionalización elaborada en 1976 por medio de datos geográficos, viales y administrativos. Estos distritos agropecuarios se convirtieron en 1981 en ocho distritos de desarrollo rural que han sido utilizadas para los programas de desarrollo regional (Rivera, 2007).

En el Estado de México uno de los principales cultivos es el trigo, el cual destaca por ser uno de los principales granos básicos, su importancia social y económica. El trigo se cultiva principalmente en zonas templadas, la temperatura adecuada para el cultivo varía entre 15 y 31°C, en general este cereal requiere de 600 a 800 mm de agua por ciclo (Parsons, 1991). La mayoría de la producción del trigo se destina para la alimentación, y casi el 75% de éste se utiliza para la producción de harina, principalmente para la elaboración de pan, sobre todo aquella procedente de trigo blanco (ICAMEX, 2008).

Por otro lado, el sorgo pertenece a la familia de las gramíneas y la importancia de este cultivo radica en que abastece de materia prima a la industria de alimentos balanceados para animales (SENASICA, 2012). El agua es muy importante en

las fases de desarrollo del cultivo de sorgo. Dicho cultivo necesita de 450 a 650 mm de agua por ciclo. Sin embargo, es una especie que tiene alta tolerancia a la sequía y a ciertos periodos de saturación de agua. La temperatura óptima para crecimiento está entre los 26,7 y 29,4°C, y la mínima de 15,6°C. (SAGARPA, 2008).

La evapotranspiración es una de las variables hidrológicas más relevantes. La cuantificación de ésta, con un nivel suficiente de precisión, es fundamental en estudios hidrológicos, en modelos de cambio climático, y en la producción de alimentos. Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo (evaporación) y transpiración de las plantas (Allen *et al.*, 2006).

El primer paso es calcular la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) que depende solo del clima. El método recomendado por la FAO es el de Penman-Monteith. Sin embargo, las variables necesarias para su aplicación son a veces escasas. La tendencia es usar métodos más simples como el Método del tanque. Debido a esto, el objetivo de esta investigación se centra en la recalibración del coeficiente K<sub>T</sub> (método de tanque evaporímetro) para la estimación de ET<sub>o</sub> y determinar el déficit hídrico del trigo y sorgo de forma espacial para el Estado de México.

## MÉTODOS

### Selección de estaciones climatológicas

En este estudio se utilizó las variables climatológicas de precipitación, evaporación, temperatura máxima, temperatura mínima y velocidad del viento a intervalos mensuales para el Estado de México. También se incorporaron las estaciones que se encontraron circundantes a una distancia de 5 km de los límites del Estado. Considerando un total de 436 estaciones regidas por la CONAGUA-SMN (Figura 1).

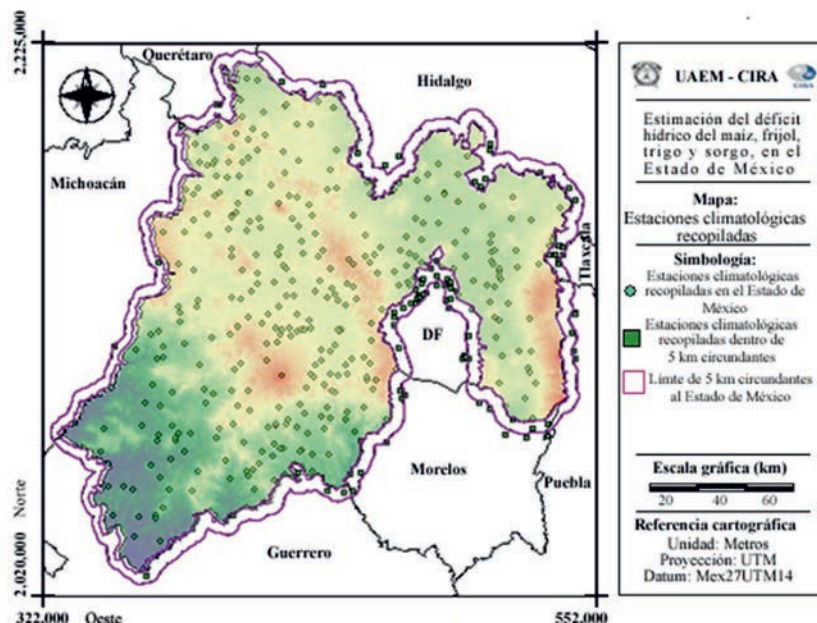


FIGURA 1. Distribución espacial de las estaciones utilizadas.

De acuerdo con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), se llevó a cabo un análisis de calidad de los datos para disminuir los errores que conlleven a la incertidumbre de los resultados de la investigación como lo sugiere Llamas, (1997) y considerar que las muestras sean válidas (Cano, 2005). Se realizaron diversos análisis para determinar la aleatoriedad, independencia y homogeneidad de las series de datos utilizados. Para evaluar la aleatoriedad se utilizó el test de “Hatanaca”, para la independencia el test de “inversión”, y para la homogeneidad el test de “Mann y Whitney”.

**Estimación de la Evapotranspiración de referencia**

Debido a la disponibilidad de estaciones regidas por CONAGUA-SMN, en este estudio se implementó el método del tanque evaporímetro, el cual fue recalibrado regionalmente para estimar la evapotranspiración de referencia mediante la ecuación 1.

$$K_T = ETo_{PM} / E_{Tan} \tag{1}$$

donde,  $K_T$  coeficiente del tanque evaporímetro;  $ETo_{PM}$  evapotranspiración de referencia estimado con Penman-Monteith (PM);  $E_{Tan}$  evaporación medida en el tanque evaporímetro.

Una vez obtenido el coeficiente  $K_T$  recalibrado regionalmente en 117 estaciones, se estimó la  $ETo$  mediante el método del Tanque Evaporímetro a intervalo mensual. Finalmente, el rendimiento en la predicción de  $ETo$  con los nuevos coeficientes  $K_T$  se evaluaron con los criterios de desviación estándar del

error (SEE), índice de correspondencia (D) y el cociente entre ambas estimaciones promedio de  $ETo$  ( $r$ ) (Willmott, 1982). Estos criterios son definidos como:

$$SEE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n-1} \right]^{0,5} \tag{2}$$

$$D = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \tag{3}$$

$$\bar{r} = \frac{\bar{P}}{\bar{O}} \tag{4}$$

donde:

$P_i$  - valor estimado con cada modelo de prueba;

$O_i$  - valor estimado con PM;

$\bar{P}$  - promedio de los valores estimados para cada modelo de prueba;

$\bar{O}$  - promedio de los valores estimados con PM;

$n$  - tamaño de la muestra.

**Estimación de la Evapotranspiración de cultivo**

La evapotranspiración por cultivo se calculó para toda el área agrícola por cultivo. La  $ETc$  se determinó como el producto de  $ETo$  y  $Kc$ .

$$ETc = ETo \cdot Kc \tag{5}$$

**CUADRO 1. Coeficientes de desarrollo de Trigo y Sorgo**

% de desarrollo	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Trigo	0,25	0,30	0,55	0,90	1,25	1,50	1,62	1,55	1,30	0,95	0,62
Sorgo	0,30	0,40	0,60	0,80	1,00	1,07	1,00	0,90	0,75	0,65	0,55

Fuente: Palacios 2002

**Estimación de la precipitación efectiva**

El método empleado para determinar la precipitación efectiva fue el propuesto por el Servicio de Conservación de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (SCS-USDA).

$$Pe = P(125-2P/125) \text{ para } P \leq 250 \text{ mm/periodo} \tag{6}$$

$$Pe = 125+0,1P \text{ para } P \geq 250 \text{ mm/periodo} \tag{7}$$

donde:

Pe-precipitación efectiva en mm/periodo;

P-precipitación observada en mm/periodo.

**Determinación del déficit hídrico**

Para determinar el déficit hídrico o necesidades de riego de los cultivos (NAR), se utilizó el software IDRISI Taiga para crear los mapas a nivel mensual de las observaciones puntuales de  $ETc$  y  $Pe$ , y mediante algebra de mapas se determinó las necesidades de riego de los cultivos, de acuerdo a los meses de desarrollo para cada cultivo.

$$NAR = ETc - Pe \tag{8}$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La base de datos de CONAGUA-SMN estuvo conformada por 436 estaciones, de las cuales el 48,6% fueron rechazados debido a que no cumplieron con los criterios de calidad requeridos. En este estudio, se utilizaron 224 estaciones correspondientes al 51,4% de la base de datos de CONAGUA-SMN.

### Recalibración del coeficiente de tanque evaporímetro $K_T$

Implementando los datos obtenidos en la recalibración regional del coeficiente  $K_T$  (Figura 2), se estimó ETo mediante el método del Tanque evaporímetro y se comparó con respecto al método de Penman Monteith para evaluar el rendimiento en la predicción de ETo. Donde se obtuvo una desviación estándar promedio de 14,78 mm-mes<sup>-1</sup>, un índice de correspondencia de 0,84, un cociente promedio entre ambas estimaciones de 0,88 y un índice de determinación de 0,85, para determinar el grado de precisión del método recalibrado, y disminuir la sobreestimación en los primeros meses del año (enero-mayo) y la subestimación del método en los meses de junio-noviembre.

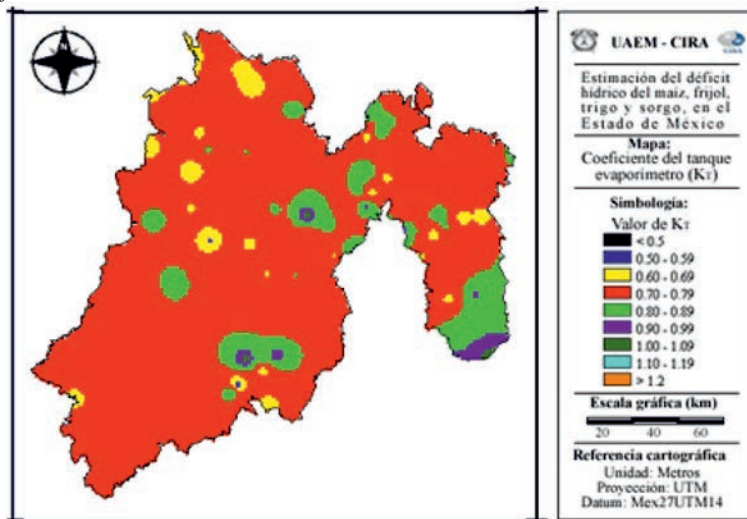


FIGURA 2. Coeficiente  $K_T$  Distribución espacial de las estaciones utilizadas.

### Determinación del déficit hídrico

El déficit hídrico para el cultivo de Trigo (Figura 3a) y Sorgo (Figura 3b) fue en promedio de 88 mm y 10 mm, para el periodo mayo-septiembre y mayo-agosto, respectivamente para los periodos recomendado por el Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria Acuícola y Forestal del Estado de México, ICAMEX.

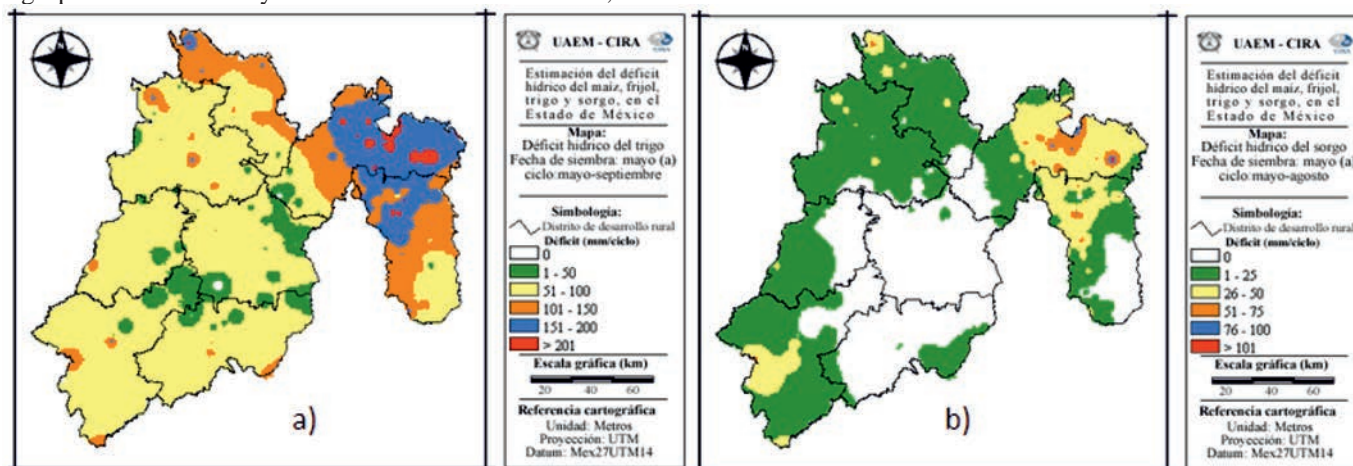


FIGURA 3. Déficit hídrico. a) Trigo (mayo-septiembre); b) Sorgo (mayo-agosto).

También se realizó la estimación del déficit hídrico para ambos cultivos desfasando la fecha de siembra recomendada por el ICAMEX un mes, el cual fue de 94 mm (Figura 4a) y 3 mm (Figura 4b). Donde se incrementaron los requerimientos hídricos un 6,8% para el cultivo del trigo, al retrasar la fecha de siembra recomendada por el ICAMEX y para el cultivo de sorgo se redujo un 30% los requerimientos hídricos.



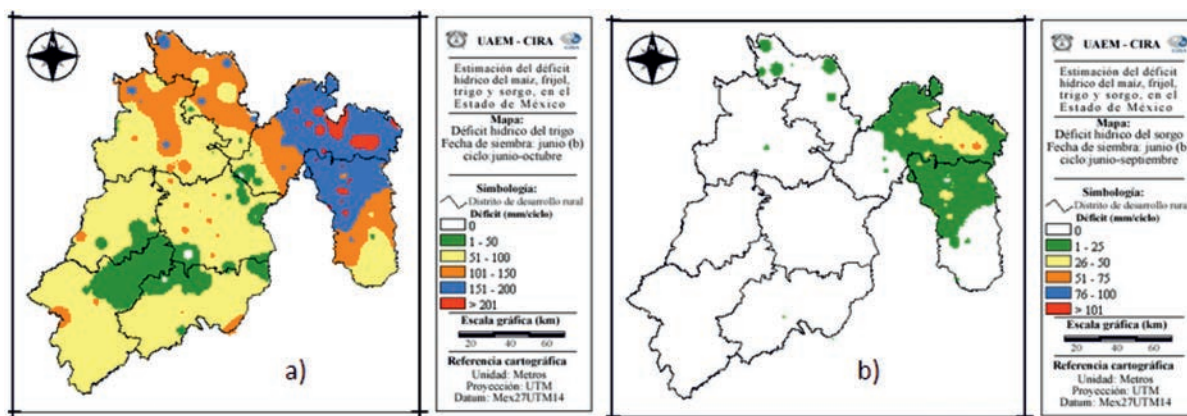


FIGURA 4. Déficit hídrico. a) Trigo (junio-octubre); b) Sorgo (junio-septiembre).

De acuerdo a los resultados obtenidos para el cultivo de Trigo y Sorgo se ve la necesidad de replantear la planificación del recurso hídrico en función de los conceptos de variabilidad espacial de tipo climático que existe en el área de influencia de los distritos, principalmente en Tejupilco y Coatepec Harinas para el cultivo de Trigo, y para el cultivo Sorgo Zumpango, Texcoco, Tejupilco, Atlacomulco, Valle de Bravo y Jilotepec.

## CONCLUSIONES

- Una alternativa para estimar ETo en zonas donde se cuenta con estaciones convencionales climatológicas, es el método del tanque evaporímetro, el cual puede ser recalibrado mediante su exponente  $K_p$  para disminuir la sobreestimación o subestimación del método. También se observó, que la ETo

es inversamente proporcional a la altitud. Debido a que la presión atmosférica varía con la altitud y al incrementarse, el agua se evapora a menor temperatura por lo tanto la evapotranspiración también lo hará.

- El desfase del establecimiento del cultivo de Sorgo, es favorable para reducir las necesidades hídricas en un 30%. Sin embargo, para el cultivo de trigo resulta contraproducente, ya que las necesidades hídricas aumentan en un 6,8%.
- Los requerimientos hídricos del cultivo de nuestro interés, son de gran importancia para prevenir el estrés hídrico y afectar la producción. Dicha estimación se puede realizar con ayuda de los Sistemas de Información Geográficas como IDRISI, y convertirse en una herramienta en la actualización de la planificación del recurso hídrico de forma espacio - temporal, debido a la variación climática actual.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALLEN, G. R., S. PEREIRA, D. RAES & M. SMITH: *Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, Serie cuadernos técnicos, FAO, Roma, Italia, 2006.
2. MÉXICO, INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y CAPACITACIÓN AGROPECUARIA ACUÍCOLA Y FORESTAL DEL ESTADO DE MÉXICO, ICAMEX: *Tollocan -F05 Una nueva alternativa de trigo para el Estado de México*, Metepec, México, 2008.
3. MÉXICO, INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA: *Aspectos del territorio estatal del Estado de México*, [en línea], Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/> [Consulta: enero 2012].
4. LLAMAS, J.: *Planificación y diseño de redes meteorológicas e hidrométricas*, Universidade Católica do Salvador. CIRA-Brasil, 1997.
5. OJEDA, B. W., L. HERNÁNDEZ, I. SÁNCHEZ: *Manual para Diseño de Zonas de Riego Pequeñas Requerimientos de riego de los cultivos*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, 2008.
6. PALACIOS, V. E.: *¿Por qué, Cuándo, Cuánto y Cómo regar? Para lograr mejores cosechas*, Ed. Trillas, México DF, México, 2002.
7. PARSONS, M. D.: *Manuales para la educación agropecuaria*. Producción vegetal Núm. 12 Frijol y chícharo, Ed. Tillas, México DF, México, 1991.
8. RIVERA, H. G.: *Desarrollo agrícola en el Estado de México 1940 - 2004*. Universidad Autónoma del Estado de México UAEMex, Estado de México, México, 2007.
9. MÉXICO, SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN, SAGARPA: *Estudio para determinar zonas de alta potencialidad del cultivo del sorgo (Sorghum bicolor L. Moench) en el Estado de Tabasco*, Tomo XVI, SEDAPOP Tabasco, México, 2008.
10. MÉXICO, SERVICIO NACIONAL DE SANIDAD INOCUIDAD Y CALIDAD AGROALIMENTARIA, SENASICA: *“Manejo fitosanitario del Sorgo”*, [en línea], Disponible en: <http://www.senasica.gob.mx/> [Consulta: Febrero 2012].
11. TRAJKOVIC, S.: “Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions”, *J. Irrig. Drain Eng.*, 133(1): 38-42, 2007.
12. WILLMOTT, C. J.: “Some comments on the evaluation of model performance”, *Bull. Am. Meteorol. Soc. AMS.*, 63, 1309-1313, 1982.

**Recibido:** 31 de julio de 2013.

**Aprobado:** 10 de septiembre de 2013.

Henry A. Kelso Bucio, Productos Agropecuarios KEBU, S.A., vía interamericana, Juay, San Félix, Chiriquí, Panamá, Correo electrónico: [henry.iah@gmail.com](mailto:henry.iah@gmail.com)