

Uso de FAO-56 y cintilómetro para estimar la evapotranspiración de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) y sus componentes: evaporación del suelo y transpiración de la planta
Use of FAO-56 and scintillometer to estimate evapotranspiration of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.) and its components: soil evaporation and plant transpiration

Jesús Enrique López Avendaño^{1,‡}, Julio César Rodríguez², José Ángel Martínez Gallardo¹, Ramón Lizárraga Jiménez¹ y Tomás Díaz Valdés¹

¹ Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa. Km 17.5 Carretera Culiacán-El Dorado. 80000 Culiacán, Sinaloa, México.

[‡] Autor para correspondencia (profe.jesus@uas.edu.mx)

² División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Departamento de Agricultura y Ganadería. Universidad de Sonora. Km 20.5 Carretera Hermosillo-Bahía Kino. 83000 Hermosillo, Sonora, México.

RESUMEN

Estimar la evapotranspiración de los cultivos (ETc) es esencial para la planificación y manejo del agua en una zona agrícola, particularmente en las regiones áridas y semiáridas; la separación de ETc en la evaporación del suelo (E) y la transpiración de la planta (T) permitiría el uso de estrategias más eficientes de gestión del agua. Los objetivos del presente estudio fueron estimar la evapotranspiración diaria de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) y sus componentes, utilizando los métodos FAO-56 con la aproximación del coeficiente dual de cultivo (Kc dual) y cintilómetro, así como, determinar los coeficientes de cultivo únicos (Kc) y basales (Kcb) para las diferentes etapas de desarrollo de sorgo. Los resultados demostraron que usar la aproximación del Kc dual permite una estimación razonable de ETc en comparación con los valores estimados utilizando el método del cintilómetro. La ETc estimada con ambos métodos fue 413.8 y 406.3 mm, respectivamente, lo que arrojó una sobreestimación del 1.8% para FAO-56. El error cuadrático medio (RMSE) entre ETc estimada fue 0.584 mm d⁻¹ y el coeficiente de concordancia de Willmott (d) fue 0.91. La evaporación representa el 17.1% de ETc estimada con FAO-56 y el 21.6% con el método del cintilómetro; el RMSE entre los valores

de E estimados con ambos métodos fue 0.397 mm d⁻¹ y d = 0.94, mientras que, cuando se comparó T, el RMSE calculado fue 0.371 mm d⁻¹ y d = 0.98. Los valores de Kc estimados con el método FAO-56 fueron 0.68, 1.06 y 0.4 para las etapas inicial, media y final del cultivo, mientras que con el cintilómetro los valores fueron 0.75, 0.94 y 0.41, respectivamente.

Palabras clave: balance de energía superficial, coeficiente dual de cultivo, scintilometría, Valle de Culiacán.

SUMMARY

Estimating evapotranspiration (ETc) is essential for water planning and management in agricultural areas, particularly in arid and semi-arid regions; ETc partitioning into soil evaporation (E) and plant transpiration (T) would allow the use of more efficient water management strategies. The aims of the present study were to estimate daily evapotranspiration of sorghum and its components, using the FAO-56 method with the dual crop coefficient (dual Kc) approach and scintillometer method, and to determine the single crop coefficient (Kc) and basal crop coefficient (Kcb) values for different development seasons.

Cita recomendada:

López Avendaño, J. E., J. C. Rodríguez, J. Á. Martínez Gallardo, R. Lizárraga Jiménez y T. Díaz Valdés. 2019. Uso de FAO-56 y cintilómetro para estimar la evapotranspiración de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) y sus componentes: evaporación del suelo y transpiración de la planta. Terra Latinoamericana 37: 141-150.
DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.393>

Recibido: 07 de febrero de 2018.

Aceptado: 06 de marzo de 2019.

Publicado en Terra Latinoamericana 37: 141-150.

Results have shown that using the dual Kc approach allows reasonable simulation of ETc in comparison to values estimated using the scintillometer method. ETc estimated with both methods was 413.8 and 406.3 mm, respectively, resulting in a 1.8% overestimation for FAO-56. Root mean square error (RMSE) was 0.584 mm d⁻¹ and Willmott's agreement coefficient (d) was 0.91. Evaporation estimated with FAO-56 was 17.1% of ETc, while with the scintillometer it was 21.6% of ETc. The RMSE of the estimated E values was 0.397 mm d⁻¹ and d = 0.94, while, when comparing T, calculated RMSE was 0.371 mm d⁻¹ and d = 0.98. Kc values estimated with the FAO-56 method were 0.68, 1.06 and 0.4 for initial, middle and end season of the crop, while for the scintillometer, values were 0.75, 0.94 and 0.41, respectively.

Index words: *surface energy balance, dual crop coefficient, scintillometry, Culiacan Valley.*

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se requiere un entendimiento claro de la dependencia de los cultivos a la disponibilidad de agua y los posibles impactos de los sistemas agrícolas en la hidrología de una región (Yimam *et al.*, 2015). El conocimiento de la evapotranspiración es esencial para los responsables de la planificación y manejo del agua en el sector agrícola, especialmente en las regiones áridas y semiáridas donde la demanda de agua de los cultivos supera la precipitación y se requiere la aplicación a través del riego. Esto es particularmente importante en áreas donde el uso del agua está regulado debido a programas de protección ecológica y existen recursos limitados que generan una alta competencia por el uso del vital líquido, lo que provoca un aumento en el grado de presión sobre los recursos hídricos. Es importante señalar que la evapotranspiración actual varía regional y temporalmente según las condiciones climáticas del área (López *et al.*, 2015), y algunos autores señalan que estas condiciones son adversas para la producción agrícola (Marine *et al.*, 2015).

La evapotranspiración consiste de dos procesos, la evaporación directa del suelo y la transpiración de la planta, y ambos ocurren simultáneamente, de modo que se han realizado importantes esfuerzos para cuantificarlos por separado (Er-Raki *et al.*, 2010; Béziat *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2015). La transpiración de las plantas está directamente asociada

a la producción de cultivos, mientras que la evaporación no contribuye a la producción en el campo, por lo que los dos procesos deben ser estudiados y cuantificados por separado para implementar estrategias de manejo del agua y programas de riego que permitan un uso eficiente (Ding *et al.*, 2013).

Se ha desarrollado una amplia variedad de métodos y modelos para estimar con precisión la ETc, los cuales se han implementado a diversas escalas espaciales y temporales, desde el más simple (balance hídrico del suelo) hasta el más complejo (covarianza de vórtices, teledetección y scintilometría). Todos los métodos presentan limitaciones relacionadas con las condiciones del experimento, así como con la cantidad y calidad de los datos requeridos para la estimación (Er-Raki *et al.*, 2013). El modelo más utilizado, por su simplicidad y robustez es el modelo FAO-56, que describe la relación entre la evapotranspiración del cultivo (ETc) y evapotranspiración de referencia (ETo) a través de un coeficiente de cultivo (Kc), que involucra los efectos de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo (Allen *et al.*, 1998). Algunos investigadores han utilizado este modelo con el enfoque de Kc único (Martínez-Cob y Faci, 2010), mientras que otros han utilizado el modelo de FAO-56 con el enfoque de Kc dual (Er-Raki *et al.*, 2008). El último, separa el valor de Kc en un coeficiente de cultivo basal (Kcb) dependiendo de las características fenotípicas, fisiológicas y morfológicas de la planta; y un coeficiente de evaporación del suelo (Ke), que básicamente, depende de la textura y densidad del suelo, así como del contenido de humedad en el mismo.

Con frecuencia, el sistema de covarianza de vórtices (CE) se utiliza en los estudios de evapotranspiración (ET) debido a su facilidad de configuración, la capacidad de proporcionar información continua y directa sobre los flujos turbulentos de superficie, y son sistemas automatizados (Zhang *et al.*, 2013). Recientemente, algunos investigadores reportan el uso de CE para estimar ET (Gebler *et al.*, 2015; Bolinius *et al.*, 2016; Imukova *et al.*, 2016), sin embargo, esta técnica es poco reportada para dividir la transpiración de la planta y la evaporación del suelo (Williams *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2013). De manera similar, algunos estudios reportan el uso de la técnica de scintilometría para estimar la ET (Ezzahar *et al.*, 2009; Cammalleri *et al.*, 2010; Samain *et al.*, 2012), pero ninguno para cuantificar la transpiración y la evaporación del suelo por separado.

México ocupa el segundo lugar a nivel mundial en la producción de sorgo después de Estados Unidos. En el período 2012-2016, la producción promedio fue de 6.6 millones de toneladas, lo que representa el 10.7% de la producción mundial; sin embargo, México también es un país importador de este cereal, toda vez que en el mismo período las importaciones promedio fueron de 652 mil toneladas (USDA, 2016). A nivel nacional, el sorgo se produce en condiciones de riego y secano; durante el período 2012-2016, el 35.5% del área total de sorgo cosechada en México fue bajo condiciones de riego, produciendo el 47.3% de la producción total con un rendimiento promedio de 4.9 Mg ha^{-1} , mientras que 64.5% de la superficie total cosechada de sorgo se sembró bajo condiciones de temporal (secano), lo que produjo un 52.7% de la producción total con un rendimiento promedio de 3 Mg ha^{-1} . El cultivo de sorgo grano ocupa el tercer lugar de la superficie cultivada en México, después del maíz y el trigo. Durante el período 2012-2016, la superficie promedio cosechada de este cereal, a nivel nacional, fue 324 612 ha, que representa el 15.2% de la superficie agrícola total cosechada. Al respecto, Sinaloa es el segundo mayor productor de sorgo en México, y aporta el 25.8% de la superficie cosechada a nivel nacional, contribuyendo con el 30% de la producción total de este cultivo (SIAP, 2016). En el Valle de Culiacán, donde se localiza el Distrito de Riego 010 "Culiacán-Humaya", la superficie promedio anual sembrada con sorgo grano para el periodo 2012-2016

fue 10 963 ha, con un volumen neto promedio de agua aplicada de $74\,423 \text{ hm}^3$, lo cual representa una lámina anual de riego de 688 mm (SEMARNAT-CONAGUA, 2017).

Para el presente trabajo se definieron dos objetivos principales: el primero, consistió en estimar la evapotranspiración del sorgo grano y sus componentes: evaporación del suelo y transpiración de la planta, utilizando el método FAO-56 con K_c dual y el método del cintilómetro; el segundo fue determinar los coeficientes de cultivos únicos y basales para el sorgo grano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Sitio

El trabajo de campo se realizó en la empresa agrícola "El Chaparral", con 80 ha sembradas de sorgo grano, localizadas en el Valle de Culiacán, al noroeste de México con coordenadas geográficas de 24.6 N y 107.588 O° (Figura 1). La zona es semiárida con una precipitación media anual total de 690 mm; la temperatura promedio anual es de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, llegando a $43 \text{ }^\circ\text{C}$ en el verano (julio) y bajando a $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ en invierno (enero). El suelo predominante es textura franco-arcillo-limosa, con densidad aparente de 1.48 g cm^{-3} . El período considerado para la estimación fue de 120 días a partir del 20 de marzo (Día del año, DOY 79) hasta el 17 de julio (DOY 198) del año 2011.

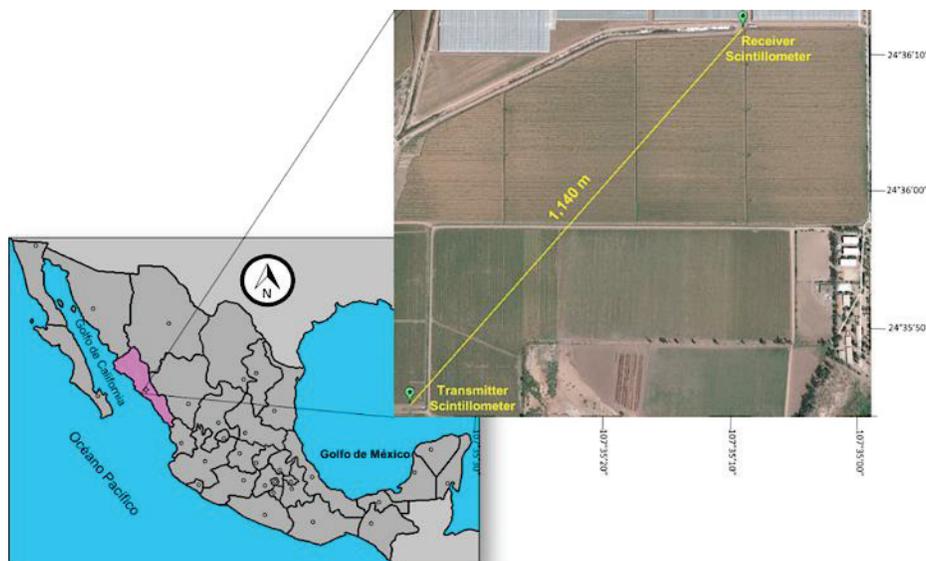


Figura 1. Localización del sitio de estudio y posición del cintilómetro.
Figure 1. Location of the study site and position of the scintillometer.

Datos Meteorológicos y Medición con el Cintilómetro

Se instaló una estación meteorológica en el sitio de estudio, donde se colocaron sensores para medir las variables meteorológicas necesarias para la estimación de la ETc. Los datos meteorológicos se consideraron por periodos de 10 min y fueron la radiación neta, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, presión barométrica, lluvia y flujo de calor del suelo. Los ajustes de datos se realizaron de acuerdo con el procedimiento descrito por Allen *et al.* (1998); por otro lado, se utilizó un cintilómetro BLS450 (Scintec®) para estimar el flujo de calor sensible en la superficie (H).

Estimación de ETc con el Método de la FAO Penman-Monteith (FAO-56) Utilizando la Aproximación de Kc Dual y la Separación de la Evaporación del Suelo (E) y Transpiración de la Planta (T)

La evapotranspiración real del cultivo (ETc) se calculó con la siguiente expresión:

$$ET_c = ET_0 (K_s K_c b + K_e) \quad (1)$$

donde: ETc es la evapotranspiración real del cultivo (mm d⁻¹), ET0 es la evapotranspiración de referencia (mm d⁻¹); Kcb es el coeficiente basal de cultivo que incluye el concepto de transpiración del cultivo, Ks es un coeficiente de estrés hídrico y Ke es el coeficiente de evaporación superficial. La ET0 se calculó con la ecuación de la FAO Penman-Monteith ajustada por periodos de 10 min (Ecuación 2) e integrada día a día.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{6.25}{T+273}\right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (2)$$

donde: Rn es la radiación neta (MJ m⁻²), G es el flujo de calor del suelo (MJ m⁻²), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹), γ es la constante psicrométrica (kPa °C⁻¹), u₂ es la velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹), (e_s - e_a) es el déficit de presión de vapor (kPa) y T es la temperatura del aire (°C).

Para el método FAO-56, se utilizaron las ecuaciones propuestas por Allen *et al.* (1998), con las cuales se calcularon y ajustaron los valores de los coeficientes requeridos, incluyendo el coeficiente basal de cultivo (Kcb), coeficiente de cultivo máximo (Kc_{max}),

coeficiente de evaporación del suelo (Ke), coeficiente de reducción de la evaporación (Kr), coeficiente de estrés hídrico (Ks), humedad totalmente evaporable (TEW), humedad fácilmente evaporable (REW), humedad totalmente disponible en la zona radicular (TAW) y la humedad fácilmente disponible en la zona radicular (RAW).

Los valores para humedad a capacidad de campo (q_{cc}), humedad a punto de marchitez permanente (q_{pmp}) y capa del suelo sujeta a la evaporación (Ze) en el sitio de estudio fueron 0.405 cm³ cm⁻³, 0.242 cm³ cm⁻³ y 0.15 m, respectivamente. Para TEW y REW, los valores calculados fueron 42.6 y 19.2 mm, respectivamente, los cuales están de acuerdo con los valores típicos de Allen *et al.* (1998); la fracción de suelo expuesta y húmeda (f_{ew}) varió de 0.97 en la etapa inicial, donde la cobertura de planta fue mínima, hasta casi cero cuando el cultivo cubrió completamente el suelo (0.05). Los valores de TAW y RAW calculados fueron 244.5 y 134.5 mm, respectivamente; la profundidad efectiva de raíz para el sorgo se fijó en 1.5 m y para la fracción de agotamiento hídrico (p) fue de 0.55 (Allen *et al.*, 1998).

Estimación de ETc con Cintilómetro (BLS) y Separación de la Evaporación del Suelo (E) y Transpiración de la Planta (T)

La estimación de ET utilizando la ecuación de balance de energía de la superficie del suelo se realizó usando un cintilómetro BLS450. El BLS es un dispositivo utilizado para derivar la intensidad de la turbulencia superficial a través de la medición del índice de refracción del aire (Cn²). La teoría de cintilometría que incluye la teoría MOST (Teoría de Similaridad de Monin-Obukhov) y las ecuaciones utilizadas para este experimento pueden revisarse en Liu *et al.* (2013). La ecuación final para calcular H se escribe como:

$$H = \rho_a C_p u_* T_* \quad (3)$$

donde: H es el flujo de calor sensible (w m⁻²), ρ_a es la densidad del aire (kg m⁻³), C_p es la capacidad de calor específico del aire a presión constante (J kg⁻¹ °K⁻¹), u_{*} es la velocidad de fricción (m s⁻¹) y T_{*} es un escalar de la temperatura (°K).

Se verificó la información obtenida con el instrumento para garantizar la calidad de los datos del BLS, para ello se consideró lo siguiente: se rechazaron

los datos de Cn^2 bajo condiciones de saturación atmosférica obtenida durante la noche, considerando solamente los datos de las 7:00 a las 17:00 h por día; además, se rechazaron los datos que se recopilaron cuando el sensor no funcionaba correctamente. Las mediciones se realizaron cada minuto y se obtuvo el promedio por cada 10 minutos para el procesamiento final.

Una vez estimado el flujo de calor sensible (H) se calculó el flujo de calor latente (LE , $w m^{-2}$) a partir de la ecuación del balance de energía mediante la medición de la radiación neta (R_n , $w m^{-2}$) y flujo de calor de la superficie del suelo (G , $w m^{-2}$) con la expresión:

$$E = R_n - G - H \quad (4)$$

Se utilizó el calor latente de vaporización (2,45 MJ) para convertir LE a un valor equivalente de lámina de agua (Allen *et al.*, 1998). Después de estimar ET_c con el método del cintilómetro, se calcularon los coeficientes K_e , K_s y K_{cb} . Al considerar que K_s depende de las condiciones de riego del cultivo y de la capacidad de retención de agua del suelo, se tomaron en cuenta los mismos valores de K_s calculados con FAO-56.

Para el cálculo de K_e , la relación entre ET_c estimada con BLS ($ET_{c_{BLS}}$), ET_o , K_s y K_{cb} ajustado se utilizó de la siguiente manera:

$$K_e = \frac{ET_{c_{BLS}}}{ET_o} - K_s K_{cb_{adj}} \quad (5)$$

Una vez calculado K_e , la evaporación del suelo (E) se estimó con la siguiente expresión:

$$E = ET_o K_e \quad (6)$$

A su vez, la transpiración de la planta (T) se calculó mediante la ecuación siguiente:

$$T = ET_{c_{BLS}} - E \quad (7)$$

Finalmente, el coeficiente basal del cultivo calculado con ET_c estimada con BLS ($K_{cb_{BLS}}$) se calculó con la expresión:

$$K_{cb_{BLS}} = \frac{T}{ET_o K_s} \quad (8)$$

Evaluación Estadística de los Modelos

El comportamiento de los modelos se evaluó utilizando varios indicadores de ajuste, siguiendo el procedimiento realizado en otros estudios previos sobre balance de agua y energía. i) Raíz media del error cuadrático (RMSE) caracteriza la varianza de los errores. ii) El error absoluto promedio (EAP) expresa la magnitud de los errores de estimación en alternativa al RMSE. iii) El índice de concordancia de Willmott (d) representa la relación entre el error cuadrático medio y el “error potencial”. iv) BIAS indica la desviación promedio de los valores estimados de aquellos considerados como valores observados o medidos. v) La eficiencia de modelación de Nash y Sutcliffe (E_f) define la relación entre el error cuadrático medio y la varianza en los datos observados restados de la unidad. Vi) Coeficiente de correlación (R) (Er-Raki *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estimación de la Evapotranspiración Real (ET_c)

La variación temporal de ET_c se estimó utilizando el método FAO-56 con la aproximación del coeficiente dual de cultivo (K_c dual), y el método del cintilómetro usando un BLS450, durante todo el ciclo vegetativo de sorgo grano de primavera-verano (P-V) en el Valle de Culiacán, México. La Figura 2 presenta la variación temporal de ET_c estimada con ambos métodos; para la ET_c estimada con FAO-56, se utilizó la aproximación con K_c dual y los valores calculados diariamente de K_e y K_{cb} , donde se muestran claramente las diferencias en la etapa inicial del cultivo, durante esta etapa, el método FAO56 refleja un valor alto de ET_c diaria, afectada por la evaporación directa del suelo; sin embargo, la humedad disponible en la capa de evaporación disminuye con el tiempo y ET_c se reduce drásticamente, debido al bajo factor de cobertura vegetal (f_c).

El comportamiento de ET_c estimada con BLS se ajusta mejor a ET_o . La ET_c diaria estimada con BLS no refleja la misma tendencia de cambio que la ET_c diaria estimada con FAO-56, lo cual posiblemente se debe a la gran cantidad de datos de suelo y cultivo requeridos, y a la escala local de este método. Cabe hacer notar

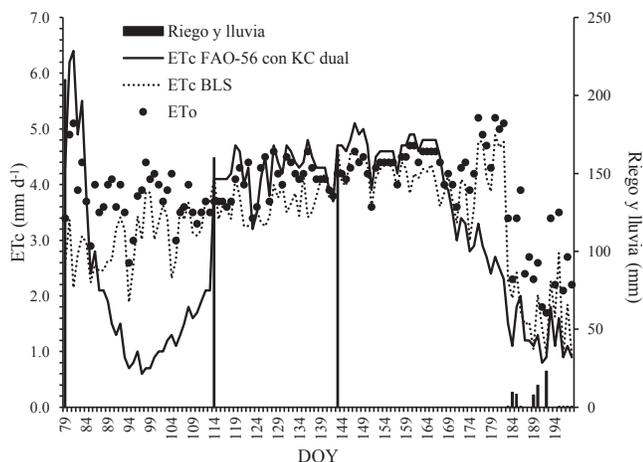


Figura 2. Evolución de la ET_0 y ETc diaria estimada con FAO-56 y BLS. Para el método FAO-56 se utilizó el Kcb estimado diariamente durante el desarrollo del cultivo.

Figure 2. Evolution of ET_0 and ETc estimated daily with FAO-56 and BLS. For the FAO-56 method, the estimated Kcb was used daily during crop development.

que el uso del cintilómetro y su técnica de cálculo es una medida con mayor cobertura (escala regional) que se basa únicamente en el balance de energía y que este método no tiene una capa de evaporación como límite al proceso. En la Figura 3 se observa un mejor ajuste de los resultados obtenidos con ambos métodos, al utilizar los valores de Kcb y K_e promedio por etapa

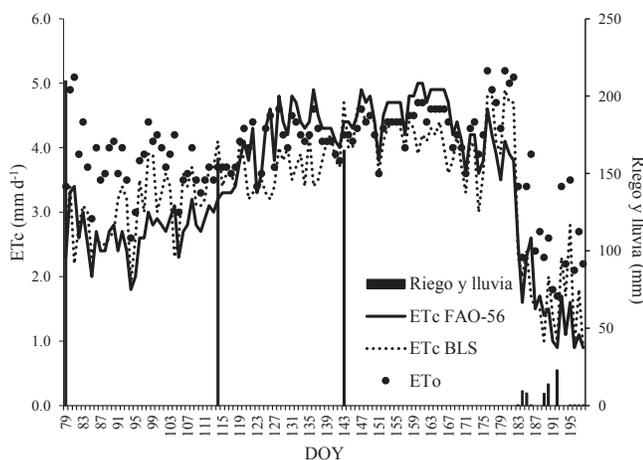


Figura 3. Evolución de ET_0 y la ETc diaria estimada con FAO-56 y BLS. Para el método FAO-56 se utilizó el Kcb promedio por etapa de desarrollo del cultivo.

Figure 3. Evolution of ET_0 and the daily ETc estimated with FAO-56 and BLS. For the FAO-56 method, the average Kcb was used per crop development stage.

de desarrollo del cultivo para el método FAO56 (K_{cb} de 0.18, 1.05 y 0.40, para las etapas inicial, media y final, respectivamente, mientras que para los valores de K_e fueron 0.50, 0.01 y 0.03 para las mismas etapas de desarrollo).

La ETc total estimada con FAO-56 utilizando K_c dual promedio por etapa de desarrollo y cintilómetro fue 413.8 y 406.3 mm, respectivamente, lo que representa una sobreestimación del 1.8% del método FAO-56. Estos valores de ETc en sorgo grano son más bajos que otros obtenidos en diferentes sitios del mundo: Bashir *et al.* (2008) obtuvieron 579 y 674 mm en Sudán, África. Piccinni *et al.* (2009) estimaron 491 y 533 mm en Texas, EE. UU; Sánchez *et al.* (2011) calcularon 500 y 524 mm en España; Shenkut *et al.* (2013) obtuvieron 500.7 mm en Etiopía y López *et al.* (2016) obtuvieron 721 y 691 mm en el área de Albacete, España. Es posible inferir que las diferencias en los resultados obtenidos en esta investigación con respecto a los estudios mencionados se deben a la duración del ciclo vegetativo considerado y a las diversas condiciones climatológicas de los sitios de estudio que aumentan la demanda evaporativa de la atmósfera, además de las diferencias por los propios métodos de estimación utilizados. El riego total aplicado y la lámina de lluvia registrada fueron de 535 mm y 65.2 mm, respectivamente. La eficiencia del riego por surcos fue de 77 y 76% aplicando los valores de ETc estimados con FAO-56 y BLS, respectivamente.

La comparación entre ETc calculada utilizando el método FAO-56 y la aproximación de K_c dual presenta un buen ajuste con la ETc estimada usando BLS (Figura 3). La raíz cuadrada del error cuadrático (RMSE) entre los dos valores fue 0.584 mm d^{-1} , el coeficiente de concordancia de Willmott (d) fue de 0.91, la eficiencia de Nash y Sutcliffe (E_f) fue 0.59, EAP fue 0.475 mm d^{-1} , BIAS fue 0.052 mm d^{-1} y el coeficiente de correlación (R) fue 0.86. Dichos resultados se ajustan de mejor manera que los reportados en Sánchez *et al.* (2011), quienes compararon los valores de ETc para el sorgo obtenido con el método TSEB (Two-Source Energy Balance) y lisímetro, donde RMSE = 1.03 mm d^{-1} , BIAS = 0.3 mm d^{-1} y R = 0.89. En otra investigación, Er-Raki *et al.* (2010) compararon el método FAO-56 con la técnica de covarianza de vórtices para la estimación de ETc en olivo, y encontraron valores de RMSE de 0.54 y 0.71 mm d^{-1} , E_f = 0.58 y 0.59 y BIAS = 0.02 y 0.05 mm d^{-1} . Por su parte, Zhang *et al.* (2013) estimaron ETc para trigo y maíz,

obteniendo valores de RMSE = 0.55 mm d⁻¹, d = 0.97 y EAP = 0.42 mm d⁻¹ y RMSE = 0.52 mm d⁻¹, d = 0.95, EAP = 0.40 mm d⁻¹, para cada cultivo respectivamente, utilizando los mismos dos métodos. Los resultados estadísticos obtenidos en la presente investigación son similares a los obtenidos por los autores citados anteriormente al comparar el método FAO-56 con el método directo de covarianza de vórtices.

Determinación del Coeficiente Dual de Cultivo (K_c dual) y Coeficiente Único de Cultivo (K_c)

Para dividir la E_{Tc} en evaporación del suelo y transpiración de la planta, se requirió determinar los coeficientes de evaporación del suelo (K_e) y coeficiente basal del cultivo (K_{cb}). Para el método FAO-56 se siguió la metodología propuesta por Allen *et al.* (1998) y para el cintilómetro se utilizaron las ecuaciones (5) y (8). En la Cuadro 1 se muestran los resultados estimados con ambos métodos y los valores tabulados propuestos por Allen *et al.* (1998) para las etapas inicial (ini), media (med) y final (fin). Asimismo, se determinaron los coeficientes únicos de cultivo (K_c) con ambos métodos, para ello se utilizó la relación $K_c = E_{Tc}/ET_0$. Los resultados se muestran en la Cuadro 1.

Los valores de K_{cb} y K_c obtenidos en esta investigación para las etapas de desarrollo inicial, media y final son diferentes a los propuestos por Allen *et al.* (1998). Otros investigadores estimaron diferentes valores para las mismas etapas de desarrollo de sorgo: Bashir *et al.* (2008) indicaron valores de K_c de 0.62, 1.15 y 0.48 estimados mediante percepción remota, mientras que con el lisímetro obtuvieron valores de K_c de 0.55, 1.21 y 0.65. Piccinni *et al.* (2009) calcularon valores para K_c de 0.40, 0.80 y 0.75, mientras que, Shenkut *et al.* (2013) estimaron valores de 0.45, 1.18

y 0.78 K_c. López *et al.* (2016) determinaron valores de K_c de 0.64 y 1.19 para las etapas de desarrollo inicial y media, respectivamente, mientras que los valores de K_{cb} para esas mismas etapas fueron de 0.11 y 1.17. Las diferencias que muestran los valores de K_c se deben a las condiciones de manejo del cultivo, las características de la variedad de cultivo y las condiciones climáticas locales (Pereira *et al.*, 2015).

Separación de E_{Tc} en Evaporación del Suelo (E) y Transpiración de la Planta (T)

Para la separación de E y T de la E_{Tc} calculada con el método del cintilómetro (BLS), se consideró que el método FAO-56 con K_c dual estima con una precisión aceptable los valores de E_{Tc} total y la transpiración de la planta (T) (Liu y Luo, 2010), aunque cabe aclarar que se han observado algunas diferencias entre E calculada con FAO-56 y otros métodos evaluados, incluyendo el método de covarianza de vórtices y lisímetros (Er-Raki *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2013).

E fue el principal componente de la E_{Tc} durante la etapa inicial de cultivo (Figura 4), con una relación E/E_{Tc} promedio de 74 para FAO56 y 76.3% para BLS (Cuadro 2). El valor alto de E en la etapa inicial del cultivo se debe a la baja transpiración (baja cobertura vegetal) y debido a la presencia de suficiente humedad en la capa superficial para satisfacer la demanda evaporativa de la atmósfera. Conforme la cobertura vegetal se incrementa durante las etapas de desarrollo, la relación E/E_{Tc} se redujo a 28.9 y 34.1% para FAO-56 y BLS, respectivamente. Mientras que, durante la etapa media, T y f_c se incrementaron a sus valores máximos (Figura 4), y la relación E/E_{Tc} se redujo al valor mínimo, 0.9 y 0.2%, para ambos métodos evaluados, respectivamente. En la etapa final, con la senescencia de hojas, aunque el valor de T disminuyó,

Cuadro 1. Valores de K_{cb} y K_c estimados para sorgo grano (P-V) en el Valle de Culiacán, México.
Table 1. Values of K_{cb} and K_c estimated for grain sorghum (P-V) in the Culiacán Valley, Mexico.

Etapa de desarrollo	K _{cb}			K _c		
	Allen <i>et al.</i> (1998)	FAO-56	BLS	Allen <i>et al.</i> (1998)	FAO-56	BLS
Inicial	0.15	0.18	0.18	0.7	0.68	0.75
Medio	1.1	1.06	0.95	1.1	1.06	0.94
Fin	0.35	0.39	0.39	0.55	0.4	0.41

K_{cb} = coeficiente de cultivo basal; K_c = coeficiente de cultivo. K_{cb} = basal crop coefficient; K_c = cultivation coefficient.

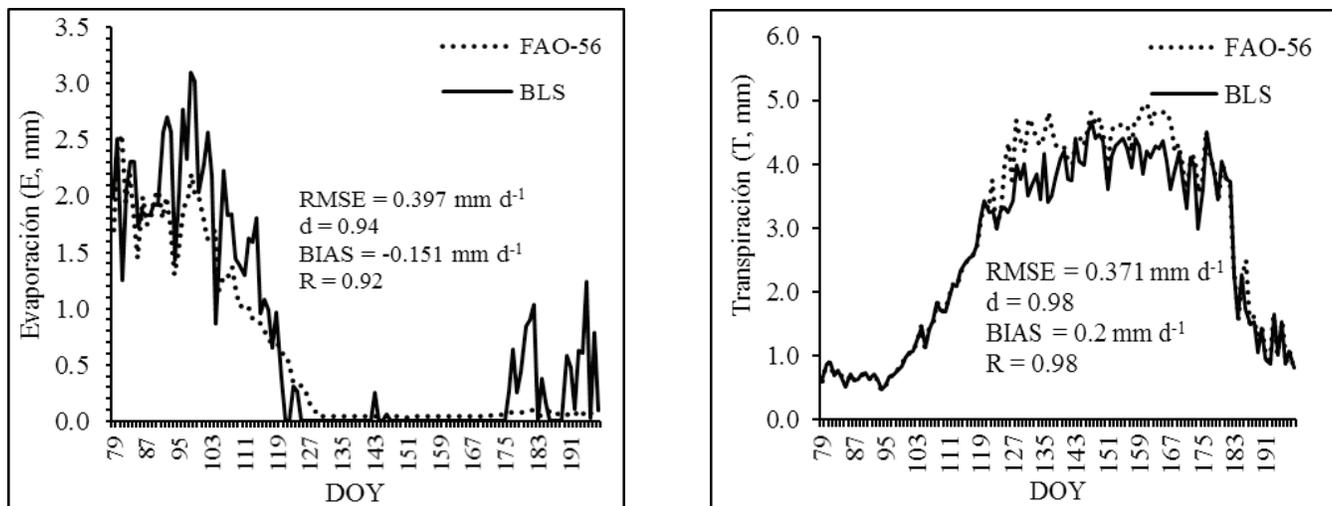


Figura 4. Comportamiento temporal de la evaporación del suelo (E) y transpiración de la planta (T), estimadas con los métodos FAO-56 y BLS.
 Figure 4. Temporal behavior of soil evaporation (E) and transpiration of the plant (T) estimated with FAO-56 and BLS methods.

fc fue alto, por lo que la relación E/ETc se mantuvo baja (2.5 y 11.2%, para FAO-56 y BLS, respectivamente), probablemente esto se debe a la presencia de lluvia durante la etapa final de cultivo.

Los resultados obtenidos con la presente investigación indican que la relación E/ETc total fue 17.1% para FAO56 utilizando Kc dual y 21.6% para BLS.

López *et al.* (2016) en la zona de Albacete (centro de España) determinaron con la medición mediante

lisímetro, que la evaporación en sorgo representa el 18% de la ETc total medida, este valor concuerda con los resultados de esta investigación. En otros estudios con trigo y maíz, se reportaron otros valores de la relación E/ETc total; por ejemplo, Zhang *et al.* (2013) reportaron 28% para el trigo de invierno y 35-45% para el maíz de verano en China; Rosa *et al.* (2012) obtuvieron 25% para el trigo y el 16% para el maíz en Portugal; mientras que, Sadras y Rodríguez (2010) determinaron 22-58% para el trigo en Australia.

Cuadro 2. Evaporación (E), transpiración (T) y evapotranspiración de real (ETc) por etapa de desarrollo del cultivo de sorgo grano en el Valle de Culiacán, México.

Table 2. Evaporation (E), transpiration (T) and evapotranspiration of real (ETc) by stage of development of the sorghum grain crop in the Culiacán Valley, Mexico.

		Inicial	Desarrollo	Media	Final	Total
FAO-56	E (mm)	38.2	28.9	1.7	2.0	70.8
	T (mm)	13.4	71.1	180.4	78.2	343.0
	ETc (mm)	51.5	100.0	182.1	80.2	413.8
	E/ETo (%)	74.0	28.9	0.9	2.5	17.1
BLS	E (mm)	43.0	35.1	0.3	9.5	87.9
	T (mm)	13.0	67.8	161.8	75.4	318.4
	ETc (mm)	56.4	102.9	162.1	84.9	406.3
	E/ETo (%)	76.3	34.1	0.2	11.2	21.6

CONCLUSIONES

- La ET_c total estimada para sorgo grano en primavera-verano con un ciclo vegetativo de 120 días fue 413.8 y 406.3 mm para los métodos FAO-56 y cintilómetro, respectivamente, donde el error relativo (ER) entre ambos resultados fue 1.8%, sobrestimándose ligeramente el valor con el método FAO-56. El desglose de los componentes fue para la evaporación del suelo (E) 70.8 y 87.9 mm, lo que representa 17.1 y 21.6% de ET_c total, para los métodos FAO-56 y cintilómetro, respectivamente. Por su parte, la transpiración de la planta (T) se estimó en 343.0 mm para FAO-56 y 318.4 mm para cintilómetro.

- Los valores calculados de K_c único para las etapas inicial, media y final del cultivo fueron 0.75, 0.94 y 0.41; mientras que los valores para K_{cb} fueron 0.18, 0.95 y 0.39, respectivamente. Sin embargo, en términos prácticos se recomienda que para sorgo grano (P-V) en el Valle de Culiacán, los valores de K_c único definitivo para la etapa inicial, media y final es 0.75, 0.95 y 0.40, respectivamente, mientras que los valores de K_{cb} son 0.20, 0.95 y 0.40 para las mismas etapas de desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa agrícola “El Chaparral” por las facilidades otorgadas para la realización del trabajo de campo en este proyecto y al Organismo de Cuenca Pacífico Norte de la Comisión Nacional del Agua por las facilidades para el uso de instrumentos de medición (cintilómetro).

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO. Rome. ISBN 92-5-104219-5.
- Bashir, M. A., T. Hata, H. Tanakamaru, A. W. Abdelhadi, and A. Tada. 2008. Satellite-based energy balance model to estimate seasonal evapotranspiration for irrigated sorghum: A case study from the Gezira scheme, Sudan. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12: 1129-1139. doi: 10.5194/hess-12-1129-2008.
- Béziat, P., V. Rivalland, T. Tallec, N. Jarosz, G. Boulet, P. Gentine, and E. Ceschia. 2013. Evaluation of a sample approach for crop evapotranspiration partitioning and analysis of the water budget distribution for several crop species. *Agric. For. Meteorol.* 177: 46-56. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.03.013.
- Bolinus, D. J., A. Jahnke, and M. MacLeod. 2016. Comparison of eddy covariance and modified Bowen ratio methods for measuring gas fluxes and implications for measuring fluxes of persistent organic pollutants. *Atmos. Chem. Phys.* 16: 5315-5322.
- Cammalleri, C., C. Agnese, G. Ciruolo, M. Minacapilli, G. Provenzano, and G. Rallo. 2010. Actual evapotranspiration assessment by means of a coupled energy/hydrologic balance model: Validation over an olive grove by means of scintillometry and measurement of soil water contents. *J. Hydrol.* 392: 70-82.
- Ding, R., S. Kang, Y. Zhang, X. Hao, L. Tong, and T. Du. 2013. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching. *Agric. Water Manage.* 127: 85-96. doi: 10.1016/j.agwat.2013.05.018.
- Er-Raki, S., A. Chehbouni, J. Hoedjes, J. Ezzahar, B. Duchemin, and F. Jacob. 2008. Improvement of FAO-56 method for olive orchards through sequential assimilation of thermal infrared-based estimates of ET. *Agric. Water Manage.* 95: 309-321.
- Er-Raki, S., A. Chehbouni, G. Boulet, and D. G. Williams. 2010. Using the dual approach of FAO-56 for partitioning ET into soil and plant components for olive orchards in semi-arid region. *Agric. Water Manage.* 97: 1769-1778.
- Er-Raki, S., J. C. Rodríguez, J. Garatuza-Payán, C. J. Watts, and A. Chehbouni. 2013. Determination of crop evapotranspiration of table grapes in semi-arid of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. *Agric. Water Manage.* 122: 12-19.
- Ezzahar, J., A. Chehbouni, S. Er-Raki, and L. Hanich. 2009. Combining a large aperture scintillometer and estimates of available energy to derive evapotranspiration over several agricultural fields in semi-arid regions. *Plant Biosys.* 143: 209-221.
- Gebler, S., F. H. J. Hendricks, T. Pütz, H. Post, M. Schmidt, and H. Vereecken. 2015. Actual evapotranspiration and precipitation measured by lysimeters: A comparison with eddy covariance and tipping bucket. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19: 2145-2161.
- Imukova, K., J. Ingwersen, M. Hevart, and T. Streck. 2016. Energy balance closure on a winter wheat stand: Comparing the eddy covariance technique with the soil water balance method. *Biogeosciences* 13: 63-75.
- Liu, S. M., Z. W. Xu, Z. L. Zhu, Z. Z. Jia, and M. J. Zhu. 2013. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. *J. Hydrol.* 487: 24-38.
- Liu, Y. and Y. Luo. 2010. A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain. *Agric. Water Manage.* 97: 31-40.
- López-Urrea, R., L. Martínez-Molina, F. de la Cruz, A. Montoro, J. González-Piqueras, M. Odi-Lara, and J. M. Sánchez. 2016. Evapotranspiration and crop coefficients of irrigated biomass sorghum for energy production. *Irrig. Sci.* 34: 287-296.
- López-Avenidaño, J. E., T. Díaz-Valdés, Ch. Watts-Thorp, J. C. Rodríguez, A. E. Castellanos-Villegas, L. Partida-Ruvalcaba y T. J. Velázquez-Alcaraz. 2015. Evapotranspiración y coeficientes de cultivo de chile bell en el Valle de Culiacán, México. *Terra Latinoamericana* 33: 209-219.

- Marine-Cirino, G., F. Justino, R. de Ávila-Rodríguez, and C. L. Teixeira-Andrade. 2015. Sensivity of the sorghum yield to individual changes in climate parameters: modelling based approach. *Bragantia* 74: 341-349. doi: 10.1590/4499.0411.
- Martínez-Cob, A. and J. M. Faci. 2010. Evapotranspiration of a hedge-pruned olive orchard in a semiarid area of NE Spain. *Agric. Water Manage.* 97: 410-418.
- Pereira, L. S., R. G. Allen, M. Smith, and D. Raes. 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agric. Water Manage.* 147: 4-20.
- Piccinni, G., J. Ko, T. Marek, and T. Howell. 2009. Determination of growth-stage-specific crop coefficients (K_c) of maize and sorghum. *Agric. Water Manage.* 96: 1698-1704.
- Rosa, R. D., P. Paredes, G. C. Rodríguez, R. M. Fernando, I. Alves, L. S. Pereira, and R. G. Allen. 2012. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software: 2. Model testing. *Agric. Water Manage.* 103: 62-77.
- Sadras, V. O. and D. Rodríguez. 2010. Modelling the nitrogen-driven trade-off between nitrogen utilization efficiency and water use efficiency of wheat in Eastern Australia. *Field Crops Res.* 118: 297-305.
- Samain, B., G. W. H. Simons, M. P. Voogt, W. Defloor, N. J. Bink, and V. R. N. Pauwels. 2012. Consistency between hydrological model, large aperture scintillometer and remote sensing based evapotranspiration estimates for heterogeneous catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16: 2095-2107.
- Sánchez, J. M., R. López-Urrea, E. Rubio, and V. Caselles. 2011. Determining water use of sorghum from two-source energy balance and radiometric temperatures. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15: 3061-3070. doi: 10.5194/hess-15-3061-2011.
- SEMARNAT-CONAGUA (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional del Agua). 2017. Estadísticas agrícolas de los Distritos de riego. Año agrícola 2015-2016. https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EA_2015-2016.pdf. (Consulta: enero 28, 2019).
- Shenkut, A., K. Tesfaye, F. Abegaz, and T. Hordofa. 2013. Determination of water requirement and crop coefficient for sorghum (*Sorghum bicolor* L.) at Melkassa, Ethiopia. *East Afr. J. Sci.* 7: 41-50.
- SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2016. Producción agrícola. <http://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119?idiom=es>. (Consulta: noviembre 13, 2016).
- USDA (United States Department of Agriculture). 2016. Grain: World markets and Trade. <http://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf>. (Consulta: noviembre 3, 2016).
- Williams, D. G., W. Cable, K. Hultine, J. C. B. Hoedjes, E. A. Yezpe, V. Simonneaux, S. Er-Raki, G. Boulet, H. A. R. De Bruin, A. Chehbouni, O. K. Hartogensis, and F. Timouk. 2004. Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques. *Agric. For. Meteorol.* 125: 241-258.
- Yimam, Y. T., T. E. Ochsner, and V. G. Kakani. 2015. Evapotranspiration partitioning and water use efficiency of switchgrass and biomass sorghum managed for biofuel. *Agric. Water Manage.* 155: 40-47.
- Zhang, B., Y. Liu, D. Xu, N. Zhao, B. Lei, R. D. Rosa, P. Paredes, T. A. Paço, and L. S. Pereira. 2013. The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain. *Irrig. Sci.* 31: 1303-1316. doi: 10.1007/s00271-013-0405-1.
- Zhao, P., S. Li, F. Li, T. Du, L. Tong, and S. Kang. 2015. Comparison of dual crop coefficient method and Shuttleworth-Wallace model in evapotranspiration partitioning in a vineyard of northwest China. *Agric. Water Manage.* 160: 41-56.