

ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DEL CULTIVO DE MAÍZ EMPLEANDO SENSORES REMOTOS

Orlando RAMÍREZVALLE^{*a}, Juan Luis JACOBO-CUELLAR^a, Víctor Manuel GUERRERO-PRIETO^b y Zenona MORALES FABIÁN^c.

^{*a}INIFAP Campo Experimental Sierra de Chihuahua Av. Hidalgo N° 1213 Colonia Centro Cd. Cuauhtémoc Chihuahua, ^bFacultad de Ciencias Agrotecnológicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua Unidad Cuauhtémoc, ^cPersonal de Apoyo INIFAP-Campo Experimental Sierra de Chihuahua
*ramirez.orlando@inifap.gob.mx

RESUMEN

La zona agrícola de Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua el cultivo predominante es el maíz, en verano el principal factor limitante es el recurso hídrico. El escaso conocimiento técnico de los agricultores, conocer la cantidad exacta de las necesidades de agua para el riego es esencial para la planificación del recurso hídrico e incrementar los rendimientos. En el presente proyecto se emplearon escenas del sensor OLI del satélite Landsat 8, del periodo 19 de abril y el 29 de noviembre del ciclo agrícola 2013. El coeficiente del cultivo (K_c) se infirió mediante el índice EVI; para su cálculo se utilizó el *software* Idrisi Selva. La evapotranspiración de referencia (E_{To}) se estimó mediante el modelo de Makkink, utilizando el *software* Matlab para facilitar el manejo de los datos provenientes de estaciones circundantes a la zona de estudio. Posteriormente se calculó la evapotranspiración real (E_{Tr}) con el producto de las imágenes de E_{To} y el K_c . Los valores del K_c estimados mediante el EVI durante el ciclo de cultivo, resultaron similares a los propuestos por la FAO-56, con valores satisfactorios de r^2 mayores a 0.89 con respecto a los valores tabulados en el manual FAO 56, se logró con ello contabilizar los flujos de agua mediante el proceso de la E_{Tr} de 444 mm para el ciclo 2013.

Palabras clave: Evapotranspiración real, Coeficiente del cultivo, flujos de agua.

ABSTRACT

CORN CROP HYDRIC REQUIREMENTS ESTIMATION BY USING REMOTE SENSING

Corn is the main agricultural crop in the Cuauhtémoc, Chih. Area, in which during the summer season, the main limiting factor is hydric resources. The scarce technical knowledge from the growers, like knowing the exact amount of water to full fill the hydric requirements of the crop is an essential knowledge to plan hydric resources and to increase yield. During the development of the present study OLI sensor Landsat 8 satellite scenes were used, within the time period from April 19 and November 29, from growing season, 2013. Crop coefficient (K_c) was inferred through EVI index; using IdrisiSelva software for calculations. Reference evapotranspiration (E_{To}) was estimated by using the Makkink model, by means of using Matlab software to facilitate data management from weather stations surrounding the study area, from which E_{To} values were calculated. After these calculations, real evapotranspiration (E_{Tr}) was calculated using E_{To} and K_c images. K_c images estimated from EVI during the growing season, were similar to those from FAO-56, with r^2 values higher than 0.89 with respect to those from FAO 56 manual. E_{Tr} estimations done with the use of Landsat 8 satellite images facilitated K_c calculations from EVI allowed to calculate water flows through the E_{Tr} of 444 mm, for the growing season 2013.

Key words: real evapotranspiration, crop coefficient, water flows.

12-16 de Octubre de 2015, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

1 INTRODUCCIÓN

El cultivo de maíz (*Zea mays*L) predomina en la zona agrícola de Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, donde en verano, el recurso hídrico y el desconocimiento para aplicarlo, son factores limitantes de la producción por lo que conocer la cantidad exacta de las necesidades de agua para el riego es esencial para la planificación del recurso hídrico y para incrementar los rendimientos. La estimación precisa de la evapotranspiración del cultivo (ETc) sirve de base para aplicar el riego de manera oportuna y asegurar la estabilidad del rendimiento de los cultivos (Allen *et al.*, 1998; De Medeiros *et al.*, 2001; Er-Rakiet *et al.*, 2007; Williams y Ayars, 2005).

Contar con una cartografía periódica y precisa de la superficie total de maíz que contenga información fenológica del cultivo, es un insumo importante para la estimación de las necesidades de riego para la toma de decisiones. Las necesidades de agua de los cultivos se pueden definir como la cantidad de agua que requiere para reponer la pérdida de agua debido a la evapotranspiración, dicha pérdida está determinada por las condiciones climáticas locales y las condiciones del cultivo. Las necesidades hídricas a través del cálculo de la evapotranspiración es un método ampliamente utilizado, de acuerdo con Ray y Dadhwal, (2001), la evapotranspiración del cultivo se rige por las condiciones del clima que prevalecen en el sitio. El Kc permite conocer el estadio fenológico teniendo como resultado la ETc.

Existen diversos métodos experimentales pero poco prácticos para la determinación del Kc, para hacer frente a estas limitaciones un enfoque práctico se basa en índices de vegetación (IV) para calcularlo. Kamble *et al.* (2013), definió al Kc como una representación directa del crecimiento de los cultivos y de las condiciones reales que imperan en el campo, por lo tanto, puede estar relacionado con los IV que es específica para el cultivo y en cada pixel. Los datos provenientes de sensores remotos pueden utilizarse para estimar algunas variables relacionadas con la fenología de la vegetación (Bastiaanssen, 2000). Los valores de reflectancia captados por los sensores proveen datos para realizar una estimación indirecta del Kc, algunos

autores han reportado gran similitud en patrones estacionales de diferentes IV en cultivos anuales (Jackson *et al.*, 1980; Bausch and Neale, 1987; Hunsaker *et al.*, 2003; Er-Rakiet *et al.*, 2007).

Los objetivos del presente trabajo fueron: estimar el coeficiente del cultivo (Kc) derivado del índice de vegetación mejorado (EVI por sus siglas en inglés) y las necesidades hídricas del cultivo (ETc) del maíz en la zona agrícola de ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua durante el ciclo agrícola 2013 empleando imágenes del satélite Landsat 8.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El estudio se condujo durante el ciclo 2013 en la zona agrícola de ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua, donde el cultivo predominante es el maíz, el área de estudio se encuentra en la parte central del Estado de Chihuahua entre los paralelos 28° 23' 47" y 28° 51' 43" latitud norte y los meridianos 106° 46' 19" y 107° 11' 20" longitud oeste (Figura 1) con un potencial agrícola del orden de las 54,568 ha bajo condiciones de riego. La zona agrícola de Cuauhtémoc tiene una altitud media de 2012 msnm, Las características climáticas del área de estudio presentan una temperatura máxima de 24.0 °C, temperatura mínima de 4.5 °C, temperatura media de 14.3 °C, con una oscilación térmica de 19.4 °C; la precipitación media anual es de 460 mm, con una evaporación anual de 2000 mm y un fotoperiodo promedio de 12 h, (Medina *et al.*, 2006; Calderón-Aguilera *et al.*, 2012).

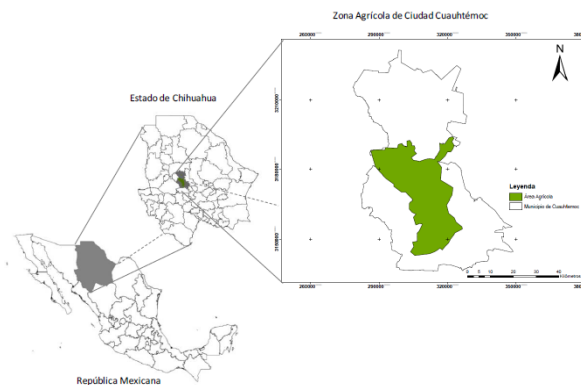


Figura 1.- Localización del área de estudio zona agrícola de ciudad Cuauhtémoc Chihuahua.

2.2 Datos y herramientas

Para llevar a cabo el presente trabajo, se utilizaron imágenes satelitales obtenidas el 19 de abril, al 29 de noviembre del año 2013 teniendo un total de 13 escenas, las imágenes fueron provistas por el sensor OLI abordo del satélite Landsat 8 (resolución espacial de 30*30 m), para el procesamiento de imágenes se utilizó el software IDRISI Selva (ClarksLab, 1987). Se recolectaron datos de estaciones meteorológicas circundantes al área de estudio para calcular la Evapotranspiración de referencia (ET_o).

2.3 Metodología

Previo al procesamiento de las imágenes satelitales se realizó una corrección atmosférica mediante el comando ATMOSC (Brizuela *et al.*, 2007). La estimación de la Evapotranspiración de referencia (ET_o) se determinó mediante la ecuación de Makkink Ecuación 1. La ET_c, puede calcularse por el producto de la evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo. Ecuación 2.

$$ET_o = C_{mak} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} \quad (1),$$

dónde ET_o, es evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹); R_s, radiación solar incidente (MJ m⁻² día⁻¹); λ, es calor latente de vaporización (MJ Kg⁻¹); γ, es la constante psicrométrica; Δ, es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹) y C_{mak} es una constante de calibración que depende del cociente R_n/R_s, una serie de experimentos han establecidos un valor de 0.65 para C_{mak}. (Steward *et al.*, 1999; Garatuzo-Payán y Watts, 2005; Cruz-Blanco *et al.*, 2014).

Con fundamento en la expresión realizada por Hargreaves y Samany (1991) la ET_r se determina mediante la expresión:

$$ET_r = ET_o * K_c \quad (2),$$

donde K_c es el coeficiente del cultivo y dependen del cultivo mismo (Allen *et al.*, 1998). El coeficiente de cultivo varía de acuerdo a la etapa fenológica con referencia a los valores globales de acuerdo con la FAO-56.

La metodología desarrollada para la estimación del Coeficiente del cultivo fue derivada de la normalización del EVI Ecuación 3. Tomando en cuenta la estrecha relación entre el crecimiento vegetativo y el incremento en los índices de vegetación.

$$EVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C_1 + \rho_{RED} - C_2 * \rho_{BLUE} + L} \quad (3),$$

donde ρ_{NIR} es la reflectividad en la banda del infrarrojo cercano, ρ_{RED} es la reflectividad en la banda visible roja, ρ_{BLUE} es la reflectividad de la banda visible azul y los coeficientes G (factor de ganancia) = 2.5, L = 1, C₁ = 6, C₂ = 7.5.

Con las escenas adquiridas se realizó una clasificación supervisada del área ocupada por el cultivo de maíz, esta clasificación se desarrolló de manera multi-temporal con la finalidad de conocer la respuesta espectral de los diferentes estadios fenológicos. Para este fin se utilizaron 48 sitios de entrenamiento, las firmas espectrales se obtuvieron mediante el cambio temporal de EVI en las diferentes etapas de crecimiento durante el ciclo vegetativo del maíz, el algoritmo de clasificación utilizado fue en de distancia mínima (*mindist*), Posteriormente la evaluación de la precisión se realizó mediante análisis estadísticos y ubicación de sitios de manera aleatoria dentro de la zona agrícola de Ciudad Cuauhtémoc con el empleo del Equipo de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés).

La determinación del K_c para maíz se realizó mediante la normalización del EVI (Groeneveld *et al.*, 2007; Hunsaker *et al.*, 2005; Schüttemeyer *et al.*, 2007), para este caso en particular se utilizó la Ecuación 4.

$$K_c = 1.20 \left[\frac{EVI - EVI_{MÍN}}{EVI_{MÁX} - EVI_{MÍN}} \right] \quad (4),$$

donde K_c es el coeficiente del cultivo, y EVI_{mín} y EVI_{máx} son los valores mínimo y máximo del EVI en todas las escenas, determinados mediante estadísticas de imágenes en toda la zona de estudio, y el valor constante de 1.20 corresponde al K_c máximo para maíz de grano (Allen *et al.*, 1998).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las mediciones de ETo se iniciaron el día 109 culminando el día 333 (19 de abril época de siembra y 29 de noviembre época de cosecha), los valores diarios de ETo se estimaron con datos obtenidos de diez estaciones meteorológicas circundantes en el área de estudio.

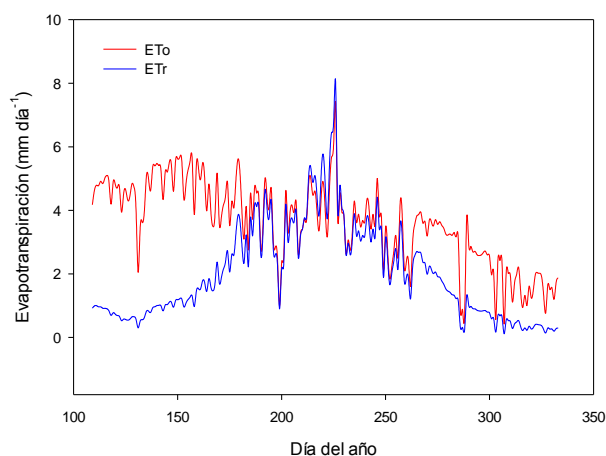


Figura 2. Distribución temporal de la ETo y ETr en la zona agrícola de Ciudad Cuauhtémoc Chihuahua ciclo 2013.

En la Figura 2 se muestra la variación temporal de la ETo, cuyos valores oscilaron entre 0.53 mm día^{-1} hasta 5.94 mm día^{-1} , mostrando cinco fechas con valores bajos de ETo en los días 11 de mayo, 18 de Julio 15, 30 de Octubre y tres de noviembre, esto debido a escasa radiación solar (R_s) y a los eventos de precipitación registrados en estas fechas, la ETo acumulada durante el ciclo fue de 807 mm. Shahrokhnia y Sepaskhah (2013) encontraron valores de la ETo en regiones áridas y semiáridas en un rango de 805 hasta 900 mm. La diferencia que se observa puede deberse a la escasa R_s resultado de la presencia de nubosidad, ya que la ETo está en función básicamente de las condiciones climáticas.

3.1 Coeficientes de cultivo estimados mediante índices de vegetación

El Kc es un elemento que nos permite conocer la etapa de crecimiento de los cultivos, además es un factor clave para la estimación de la ETr. Los valores del Kc en el presente estudio se estimaron mediante el uso de sensores remotos (Ecuación

4), utilizando la relación empírica de los índices de vegetación durante el desarrollo del cultivo.

Las estimaciones iniciales del Kc se realizaron para los días de paso del satélite. Sin embargo, para la estimación de la ETr diaria, fue necesario calcular los valores diarios del Kc durante el periodo de estudio. Para ello se realizó una interpolación lineal entre los días de paso del satélite, utilizando el software Matlab.

Los resultados obtenidos en el presente estudio mostraron alta correlación con respecto a los valores de la FAO-56 en la predicción de los valores del Kc ($r^2 > 0.89$) para la zona. Los Kc estimados fueron similares a los encontrados por Gao *et al.* (2009) en las tres etapas de desarrollo vegetativo; Kc inicial (0.36), Kc medio (1.15) y Kc final (0.35). De la misma manera, estudios realizados por Ojeda-Bustamante *et al.* (2006), obtuvieron valores similares a los encontrados en la zona de estudio.

La estimación del intercambio de agua hacia la atmósfera por efecto de la ETr se puede definir como la lámina neta utilizada por el cultivo para sus procesos fisiológicos. Para la obtención de esta variable, se multiplicaron los mapas del Kc por los mapas de la ETo. Como resultado la determinación de la ETr que es fundamental para establecer la aplicación oportuna del agua de riego.

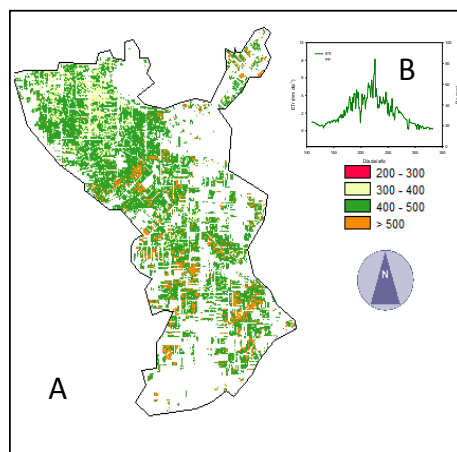


Figura 3. Distribución espacial de la ETr para el cultivo de maíz ciclo agrícola 2013.

Los resultados del cálculo de la ETr se presentan en la Figura 3B. Los valores oscilaron de 0.11 mm día^{-1} hasta un valor máximo de 6.07 mm día^{-1}

¹. Los valores máximos de la ETr se presentaron en los meses de julio y agosto, cuando la vegetación está en pleno desarrollo y cubriendo en su totalidad el suelo. En esta etapa, las pérdidas de agua por evapotranspiración se incrementan debido al crecimiento vegetativo y cuando la disponibilidad del agua decrece a niveles críticos, provoca que el rendimiento del cultivo disminuya.

Durante el ciclo del cultivo, la ETr acumulada fue de 444 mm en la zona de estudio (Figura 3A). Los valores encontrados en el presente estudio son similares a los reportados por Jiang *et al.* (2014) en la región noroeste de China, donde se obtuvieron valores de ETr en los ciclos 2012 y 2013, de 455 y 430 mm, respectivamente.

Por otra parte, Liu *et al.* (2002), en el norte de China, estimaron una ETr de 420 mm para el cultivo de maíz. De la misma manera, Ojeda-Bustamante *et al.* (2006), encontraron valores de la ETr de 442 mm en el norte de Sinaloa. Los valores mencionados anteriormente son muy similares a los obtenidos en el presente estudio.

4. CONCLUSIÓN

En la presente investigación se logró desarrollar las bases que permiten monitorear el desarrollo de los cultivos mediante técnicas de percepción remota, con la finalidad de que los encargados del manejo del agua en zonas agrícolas, tomen decisiones acertadas en la oportunidad de aplicación del agua de riego, mediante el conocimiento del desarrollo fenológico del cultivo y la demanda atmosférica.

Las estimaciones realizadas de la ETo con el modelo de Makkink permitieron la generación de mapas de su distribución espacial, con lo cual se pueden conocer las tasas de intercambio de agua del sistema suelo-planta-atmósfera, aspecto clave en el manejo del agua para riego. Esto posibilitó el desarrollo de una herramienta de gran utilidad para el monitoreo de la demanda atmosférica de agua, logrando con ello determinar la ETo a escala regional, en especial en zonas donde las estaciones meteorológicas se encuentran distantes y en ocasiones los datos registrados no son consistentes.

Los valores del Kc estimados mediante el EVI durante el ciclo de cultivo, resultaron similares a los propuestos por la FAO-56, con valores satisfactorios de r^2 mayores a 0.89, del área agrícola de Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua.

Las estimaciones de la evapotranspiración real (ETr), realizadas mediante la utilización de imágenes del satélite Landsat 8, facilitaron el cálculo de los Kc a partir del EVI, logrando con ello contabilizar los flujos de agua mediante el proceso de la ETr, en la zona agrícola de Ciudad Cuauhtémoc, específicamente en las parcelas sembradas con maíz. La variación en la estimación de la ETr quizás se debió a la respuesta a eventos de precipitación, riego, o bien a la diferencia en las fechas de siembra.

5. REFERENCIAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. "Evapotranspiración Del Cultivo, Guías Para La Determinación de Los Requerimientos de Agua de Los Cultivos." *FAO Riego y Drenaje paper 56*. 300 pp.
- Bastiaanssen, W. G. M. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229, 87-100.
- Bausch, W.C. and Neale, C.M.U. 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: A concept. *Trans. ASAE*. 30: 703-709.
- Brizuela A. B., Aguirre C. A. y Velasco I. 2007. Aplicación de Métodos de Corrección Atmosférica de Datos Landsat 5 Para Análisis Multitemporal. *Memorias de congreso TELEDETECCIÓN-Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. Ed. Martín, 2007. ISBN: 978-987-543-126-3
- Calderon-Aguilera, L. E., Rivera-Monroy, V. H., Porter-Bolland, L., Martínez-Yrizar, A., Ladah, L. B., Martínez-Ramos, M., Búrquez, A. 2012. An assessment of natural and human disturbance effects on Mexican ecosystems: Current trends and research gaps. *Biodiversity and Conservation*, 21, 589-617.
- Clark Labs. 1987. *IDRISI Selva*. Worcester, Massachusetts, United States. 322 pp.
- Cruz-Blanco, M., I.J. Lorite, and C. Santos. 2014. "An Innovative Remote Sensing Based Reference Evapotranspiration Method to Support Irrigation Water Management under Semi-

- Arid Conditions.” *Agricultural Water Management* 131: 135–45.
- De Medeiros, G.A., Arruda, F.B., Sakai, E.I., Fujiwara, M., 2001. The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop coefficient of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agric. Water Manage.* 49, 211–224.
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Guemouria, N., Duchemin, B., Ezzahar, J., Hadria, R. 2007. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of water crops in a semi-arid region. *Agriculture Water Management*, 87:41-54.
- Gao, Y., Aiwang D., Jingsheng S., Fusheng L, Zugui L, Hao L., and Zhandong L. 2009. “Crop Coefficient and Water-Use Efficiency of Winter Wheat/spring Maize Strip Intercropping.” *Field Crops Research* 111(1-2): 65–73.
- Garatuza-Payan, J. and Christopher J. W. 2005. “The Use of Remote Sensing for Estimating ET of Irrigated Wheat and Cotton in Northwest Mexico.” *Irrigation and Drainage Systems* 19(3-4): 301–20.
- Groeneveld, D. P., W. M. Baugh, J. S. Sanderson, and D.J. Cooper. 2007. “Annual Groundwater Evapotranspiration Mapped from Single Satellite Scenes.” *Journal of Hydrology* 344(1-2): 146–56.
- Hunsaker, D. J., Paul J. P., and Bruce A. K. 2005. “Wheat Basal Crop Coefficients Determined by Normalized Difference Vegetation Index.” *Irrigation Science* 24(1): 1–14.
- Hunsaker, D.J., P.J. Pinter Jr, E M. Barnes, BA. Kimball. 2003. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. *Irrigation Science*, 22:95-104.
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., and Pinter, P. J., Jr. 1980. Remotely sensed crop temperatures and reflectances as input to irrigation scheduling. *Irrigation and Drainage Special Conf. Proc.*, ASCE, New York, 390-397
- Jiang, Xuelianx, Shaozhong Kang, Ling Tong, Fusheng Li, Donghao Li, Risheng Ding, and Rangjian Qiu. 2014. “Crop Coefficient and Evapotranspiration of Grain Maize Modified by Planting Density in an Arid Region of Northwest China.” *Agricultural Water Management* 142: 135–43.
- Kamble B., Kilie A. y Hubbard. 2013. Estimating crop coefficient Using Remote Sensing-Based Vegetation Index. *Remote Sensing*. 2013. 5, 1588-1602.
- Liu, Changming, Xiying Zhang, and Yongqiang Zhang. 2002. “Determination of Daily Evaporation and Evapotranspiration of Winter Wheat and Maize by Large-Scale Weighing Lysimeter and Micro-Lysimeter.” *Agricultural and Forest Meteorology* 111(2): 109–20.
- Medina, G.G., Díaz, P.G., Berzoza, M.M., Marin, S.M., Cano, G.M.A., Chavez S. AH. 2006. *Estadísticas Climatológicas Básicas del Estado de Chihuahua (Periodo 1961-2003)*. Centro de Investigación Regional Norte Centro. Dirección de Coordinación y Vinculación Estatal en Chihuahua. Pp. 1-247.
- Ojeda-Bustamante. W., Bustamante-Ibarra E. y Unland-Welss H. 2006. Programación integral del riego en Maíz en el norte de Sinaloa México. *Agrociencia* Vol. 40. No. 1. Pp. 13 -25.
- Ray, S.S., Dadhwal, V.K. 2001. Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS. 2001. *Agricultural Water Management* 49. pp239-249.
- Shahrokhnia, M. H., and a. R. Sepaskhah. 2013. “Single and Dual Crop Coefficients and Crop Evapotranspiration for Wheat and Maize in a Semi-Arid Region.” *Theoretical and Applied Climatology* 114(3-4): 495–510.
- Schüttemeyer, D., Ch Schillings, A. F. Moene, and H. A. R. de Bruin. 2007. “Satellite-Based Actual Evapotranspiration over Drying Semiarid Terrain in West Africa.” *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 46(1): 97–111.
- Stewart, J.B., C.J. Watts, J.C. Rodriguez, H.a.R. De Bruin, a.R. van den Berg, and J. Garatuza-Payán. 1999. “Use of Satellite Data to Estimate Radiation and Evaporation for Northwest Mexico.” *Agricultural Water Management* 38(3): 181–93.
- Williams LE, Ayars JE, 2005. Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 132:201-211.