



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

ANÁLISIS HISTÓRICO DE LOS VALORES DE ET_c DE UNA ZONA DE RIEGO ESTIMADOS MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES

**Braulio Antonio Vázquez Rodríguez¹; Ronald Ernesto Ontiveros Capurata²;
Waldo Ojeda Bustamante³; Alberto González Sánchez⁴**

¹Posgrado en Ciencias y Tecnología del Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

b_v_r@outlook.com (*Autor de correspondencia)

²CATEDRA CONACYT- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Subcoordinación de Ingeniería de Riego. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

³Subcoordinación de Ingeniería de Riego. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

⁴Subcoordinación de Operación y Mantenimiento de Infraestructura Hidroagrícola. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

Resumen

Estimar la evapotranspiración de cultivo (ET_c), es fundamental para la gestión hídrica en zonas agrícolas; su valor es estimado de modelos empíricos e información de estaciones meteorológicas cercanas, este método extrapola valores puntuales a grandes superficies, generando errores debido a su variabilidad espacial. Una forma de mejorar su resolución espacial es mediante modelos de balance de energía alimentados con información de sensores remotos. En este trabajo se estimaron los valores de ET_c para una zona agrícola de 22,142 hectáreas, en el Distrito de Riego 075 Río Fuerte, al noreste de Los Mochis, Sinaloa, siendo los cultivos más representativos por superficie sembrada: maíz-grano, frijol, caña de azúcar, jitomate y papa. Se elaboró un banco de imágenes satelitales de la serie LANDSAT (5TM, 7ETM y 8OLI/TIRS), para el periodo 1995 - 2018, las cuales fueron corregidas mediante el software QGIS e incorporadas a un modelo de balance de energía superficial en tierra, (SEBAL) (Bastiaanssen, 1995), mediante programación en lenguaje R. El análisis muestra valores de ET_c entre 0.02 a 11.28 [mm/día], promedios anuales entre 2.68 a 4.08 [mm/día], al promedio mínimo en septiembre de 2000 con 1.47 [mm/día] y al promedio máximo en junio de 2008 con 7.36 [mm/día]. Un comportamiento mensual monomodal coincidente al periodo de siembra y cosecha en la región, de mínima en diciembre (2.24 mm/día) y máxima en junio (4.14 mm/día). Y un volumen anual medio requerido por los cultivos de 33.7 [m³/día/ha], con mínima de 22.44 [m³/día/ha] en diciembre y máxima de 41.45 [m³/día/ha] en junio.

Palabras claves: Evapotranspiración de cultivo, modelos de balance de energía, Percepción Remota, SEBAL.



Introducción

Estimar la ETc favorece una gestión eficiente en el riego (Johnson y Trout, 2012), ayudando a anticipar la sobreexplotación o la mitigación de efectos negativos en la disponibilidad del recurso hídrico.

Para el sector hídrico y agrícola, las técnicas de percepción remota han resultado herramientas indispensables para analizar diferentes tipos de sistemas físicos, dentro de estas, los modelos de balance de energía han tenido gran aceptación cuando se requiere analizar la evapotranspiración de cultivo (ETc), dichos modelos comenzaron a desarrollarse desde finales del siglo XX, y han continuado su desarrollo con la llegada de nueva tecnología espacial y sensores remotos.

Existen diversas metodologías para el cálculo de la ETc mediante percepción remota a partir de los modelos de balance de energía, uno de ellos es *SEBAL* desarrollado por Bastiansen en 1995, basado en este, se encuentra *METRIC*, propuesto por Allen en 2007; existen variaciones del modelo original como *S-SEBI* (Roerink G.J. y Menenti M., 2000), *SEBS* (Su Z., 2002) o *ReSET* (Elhaddad y Garcia, 2008), que han sido desarrolladas con el mismo propósito.

En México se han implementado estas técnicas en zonas agrícolas bajo riego (i.e. Gordillo Salinas, 2014), y han formado parte de estudios hidrológicos encargados por Comisión Nacional del Agua a diferentes organismos internacionales (i.e. *WaterWatch-CONAGUA*, 2005) de manera esporádica. El uso de estas herramientas tecnológicas representa una ventaja para la agricultura de precisión, mientras que el hecho de utilizar software libre como R (*R Core Team*, 2018) y *QGIS* (*QGIS Development Team*, 2018), permite un mayor acceso e innovación de la mismas.

En la región del norte del Sinaloa en México no se cuenta con un análisis geoespacial de la evapotranspiración que permita estimar el gasto de los cultivos con precisión. Las mediciones de este parámetro son comúnmente adquiridas de forma tradicional con métodos directos o empíricos, los cuales requieren de información obtenida en campo, la cual es de carácter puntual. En consecuencia, contar con una base de datos geoespacial de los valores de evapotranspiración y un análisis de la variabilidad espacio temporal puede ayudar a gestionar el recurso hídrico dentro de los ciclos agrícolas de esta región.

Por lo tanto, en el presente trabajo se elaboró una base de datos de imágenes satelitales y valores de ETc estimados mediante imágenes satelitales, así como un análisis espacio temporal de dichos valores para la zona agrícola del distrito de riego 075 Río Fuerte en el norte de Sinaloa y que coadyuve en la generación de políticas del uso del recurso hídrico.

Materiales y M3todos

Ubicaci3n

El distrito de riego 075 - R3o Fuerte se ubica en el estado de Sinaloa, M3xico, cuyo esquema regional se aprecia en la figura 1. Se trata de los m3dulos de Santa Rosa y Batequis, los cuales fueron considerados dentro de un pol3gono de 22,142 hect3reas. Se trata de una zona agr3cola muy importante, en d3nde se cultiva principalmente ma3z grano, frijol, ca3a de az3car, jitomate y chile verde entre otros, en un ciclo de oto3o a verano.

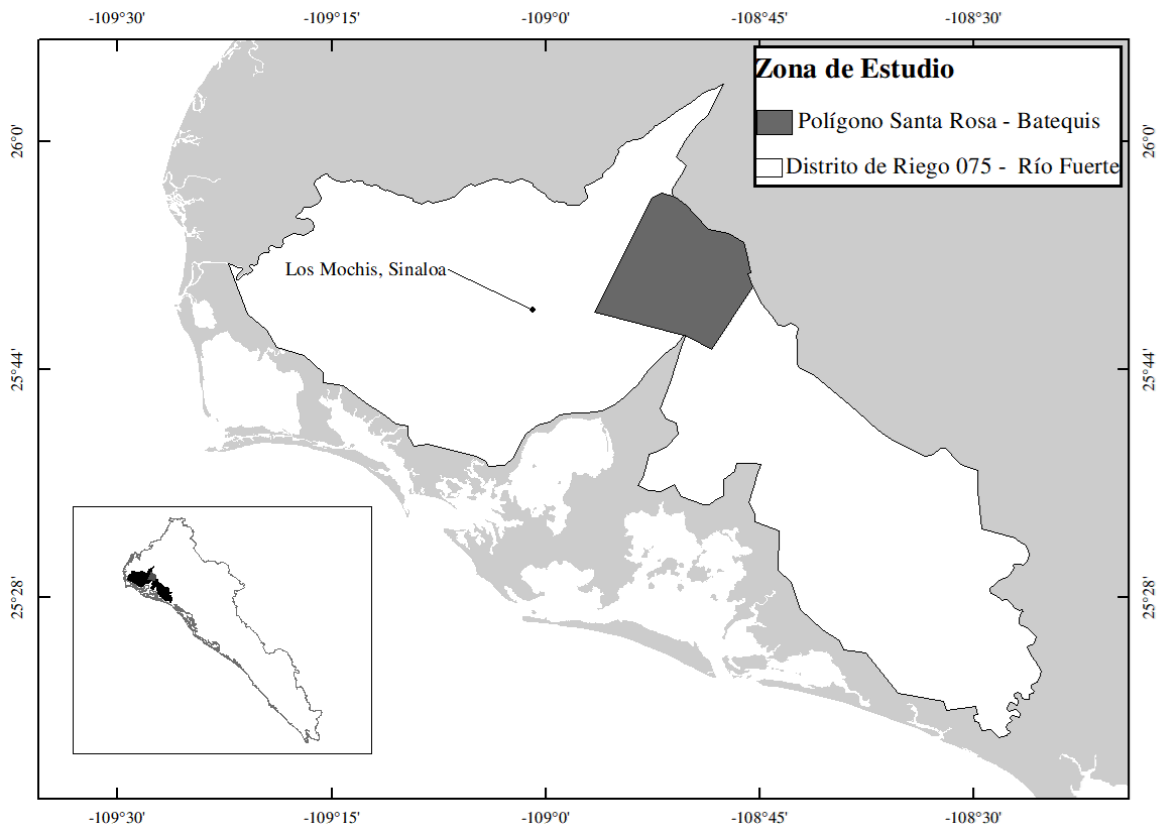


Figura 1. Mapa de localizaci3n de la zona de estudio

Las normales climatol3gicas del Servicio Meteorol3gico Nacional (SMN, 2016), reportan en la regi3n de los Mochis, Sinaloa, para el periodo de 1981 a 2010, una temperatura m3xima de 33°C, m3nima de 18.7°C y media de 25.9°C, as3 como una precipitaci3n anual de 357.4 mm y evaporaci3n total de 2,123.3 mm, con un clima de tipo C3lido - H3medo.

Materiales

Se utilizaron 201 im3genes satelitales de tres sensores de serie *LANDSAT*, de las cuales, 133 provienen del sensor 5-TM, 19 del 7-ETM y 49 del 8-OLI/TIRS, y corresponden a distintas fechas entre los a3os 1995 a 2018.



Las imágenes satelitales fueron descargadas de distintas fuentes públicas disponibles, en este caso de las aplicaciones en línea del Servicio Geológico Norteamericano, como: *EarthExplorer*, *Glovis* y *ESPA* (USGS, 2018).

Además, se utilizó la información de bases de datos de cuatro estaciones climatológicas pertenecientes a la red del INIFAP (2016), las cuales fueron seleccionadas por su cercanía a la zona de estudio (< 5 Km), tales fueron: JJ. Ríos, Taxtes, Camajoa, La Genoveva.

Para la descarga de las imágenes satelitales y su posterior corrección radiométrica y calibración atmosférica se utilizó el software *QGIS*, el procesamiento efectuado para obtener los modelos de ETc fue realizado con el paquete denominado “water” (Olmedo G. F. et al., 2016) en software R, además de su análisis.

Modelos de balance de energía

Los modelos de balance de energía de superficie, son modelos físicos basados en la interacción de la energía proveniente del sol con la superficie terrestre, su uso se fundamenta en el cálculo de valores de energía reflejada al sensor derivados de un intercambio de energía entre los sistemas involucrados. El modelo general del balance de energía en la superficie terrestre se muestra en la ecuación 1.

$$R_n = G + H + \lambda ET \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

R_n : Es el flujo de radiación neta

G : Densidad de flujo de calor del suelo en la superficie

H : Densidad de flujo de calor sensible

λET : Densidad de flujo de calor latente o energía latente consumida por la ET.

Modelo de balance de energía en superficie (*SEBAL, Surface Energy Balance at Land*)

Fue desarrollado por Bastiaanssen (1995), se aplica a imágenes satelitales *LANDSAT*, y tiene una amplia aceptación (i.e. Kiptala et al., 2013; Li et al., 2013), el concepto del modelo se enfoca en resolver la ecuación de balance de energía para obtener ET (Ec.1).

A partir de las imágenes satelitales corregidas radiométricamente y por efectos de atmósfera, se calcula el modelo *SEBAL*, el cual resuelve cada uno de los componentes de la ecuación 1,

$$R_n = (1 - a)R_{S\downarrow} + (R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow}) - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad [W/m^2] \quad (\text{Ec.2})$$

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98 * NDVI^4) \quad (\text{Ec.3})$$

$$H = \frac{\rho_a c_p \delta T_a}{r_{ah}} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (\text{Ec.4})$$



$$ET_{inst} = (R_n - G - H) / \lambda \left[\frac{mm}{hr} \right] \quad (Ec.5)$$

$$ET = ET_{rF} * ET_{24} [mm/día] \quad (Ec.6)$$

Dónde: a [adim] es el albedo, $R_{S\downarrow}$ [W/m^2] es la radiación de onda corta y $R_{L\downarrow}$ y $R_{L\uparrow}$ [W/m^2] es la radiación de onda larga entrante y saliente respectivamente, ε_0 [adim] la emisividad de la extensión total de las bandas, T_s [K] es la temperatura de la superficie, $NDVI$ [adim] es el índice de vegetación de diferencia normalizada, ρ_a [Kg/m^3] es la densidad del aire, c_p es el calor específico del aire igual a 1,004 [$J/kg/K$], δT_a [K] es la diferencia de temperaturas entre 0.1 y 2 m, r_{ah} [s/m] es la resistencia aerodinámica al transporte de calor, ET_{rF} [adim] es la fracción evapotranspirativa y ET_{24} [mm/d] la evapotranspiración diaria en la estación.

Modelo de mapeo de evapotranspiración con calibración interna (*METRIC*)

Allen R. (2007), propone el modelo *METRIC* (*Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration*), para resolver la ecuación de balance de energía (Ec.2). En esencia, está basado en el modelo *SEBAL*, sin embargo, existen diferencias entre ambos, por ejemplo, en la condición de selección de pixel húmedo o frío para el cálculo de la diferencia de temperaturas (δT_a), y, por otro lado, en cómo se determina la fracción evapotranspirativa (Ec. 7).

$$ET_{rF} = \frac{ET_{inst}}{ET_{ref}} [mm/día] \quad (Ec.7)$$

Donde ET_{ref} es calculado como la evapotranspiración de referencia de Penman-Monteith por hora para *METRIC*, mientras que *SEBAL* utiliza para el cálculo de la ecuación 6, las ecuaciones 8 y 9.

$$ET_{rF} = \frac{\lambda ET}{R_n - G} [mm/día] \quad (Ec.8)$$

$$ET_{24} = \frac{86400 * ET_{rF} * (R_{n24} - G_{24})}{\lambda} [mm/día] \quad (Ec.9)$$

Donde R_{n24} y G_{24} son la radiación neta y el flujo de calor del suelo durante el día (24 horas), respectivamente.

Resultados y Discusión

Las imágenes *LANDSAT* fueron corregidas a valores de reflectancia, se calculó el modelo de balance de energía para la zona de estudio siguiendo en primera instancia la metodología del modelo *SEBAL*, y agregando el cálculo de ET_{rF} de *METRIC* (Ec.7), constituyendo así el modelo A, la serie completa de medias del modelo calculado se muestran en la figura 2, en donde se observa en el día 24/06/2008 se obtuvo el valor más alto con 7.36 [mm/d], y en el día 06/09/2000 el más bajo con 1.47 [mm/d], oscilando entre 0.02 a 11.28 [mm/día].

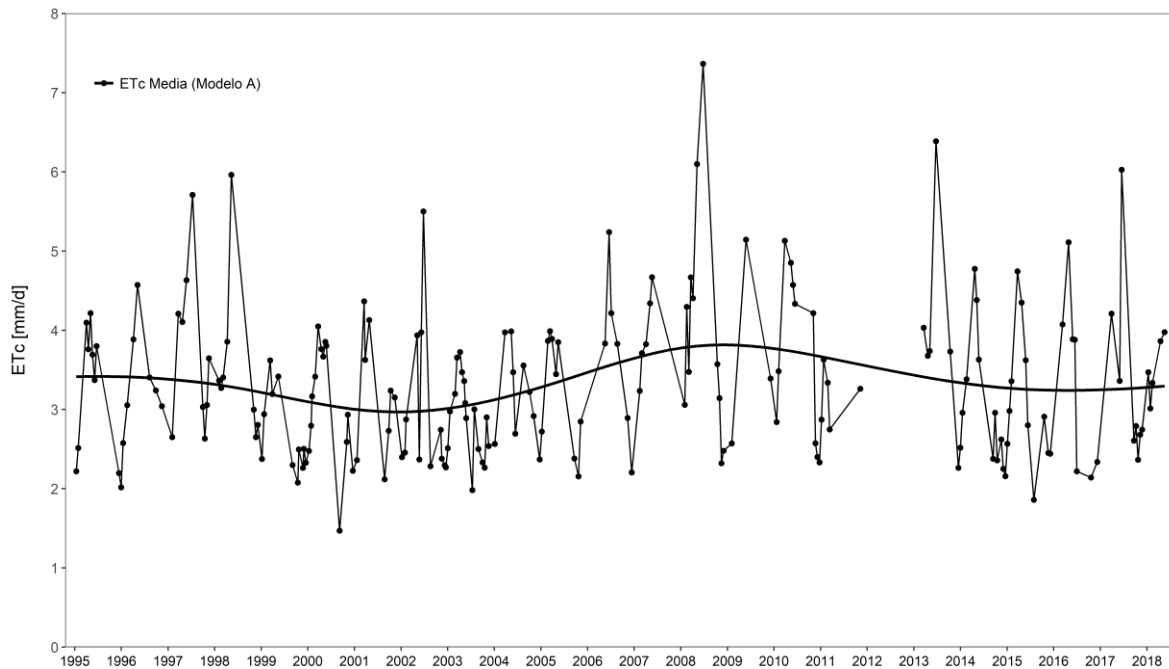


Figura 2. Serie completa de ETc media en la zona de estudio.

Variabilidad espacial de ETc

Del total de modelos generados (201), se realizó un análisis espacial estadístico de los valores resultando en mapas que se muestran en la figura 3.1 y 3.2, en donde se observa la variabilidad espacial de ETc para el modelo en estudio (A), y da registro a los mapas de ETc media (Fig. 3.1a), mapa de desviación típica (Fig. 3.1b), de mínimas (Fig. 3.2c) y máximas (Fig. 3.2d) para la zona de estudio.

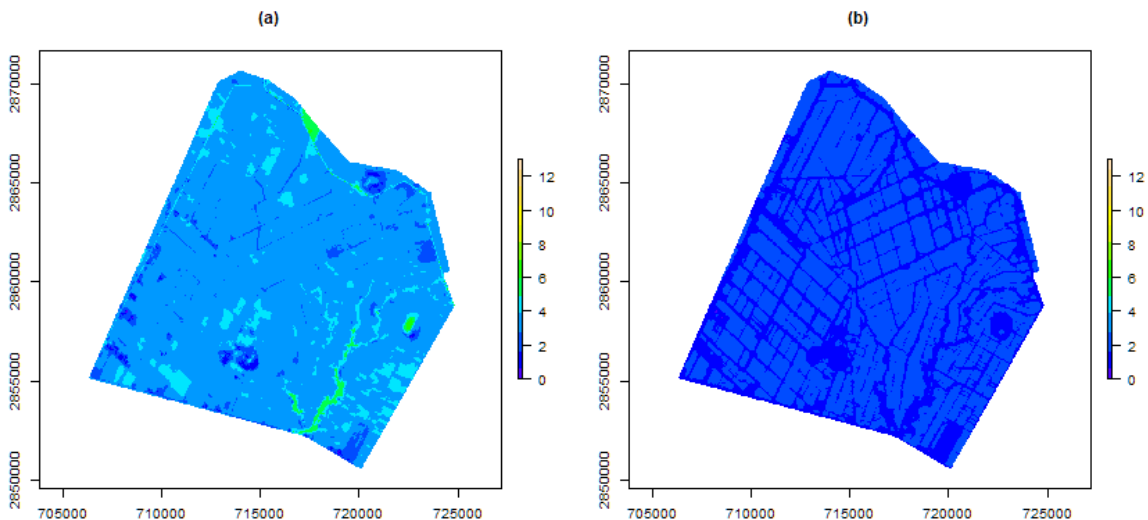


Figura 3.1. Variabilidad espacial de ETc [mm/d]: (a) media, (b) desviación típica.

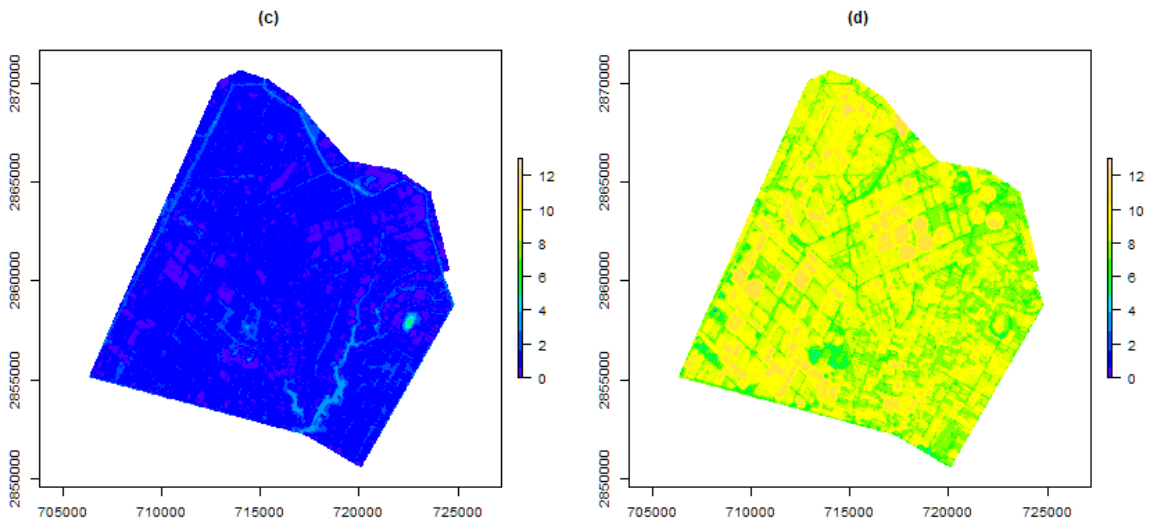


Figura 3.2. Variabilidad espacial de ETc [mm/d]: (c) mínimas, (d) máximas.

Variabilidad temporal de ETc

La evolución del valor de ETc media anual oscila entre 2.68 a 4.08 [mm/día], con mínimo en el año 1999 y máximo en el año 2008, presenta una tendencia positiva, con un incremento de 0.002% anual (Fig. 4), el cálculo del volumen anual medio requerido por hectárea fue de 33.7 [m³/día/ha] para la zona de estudio.

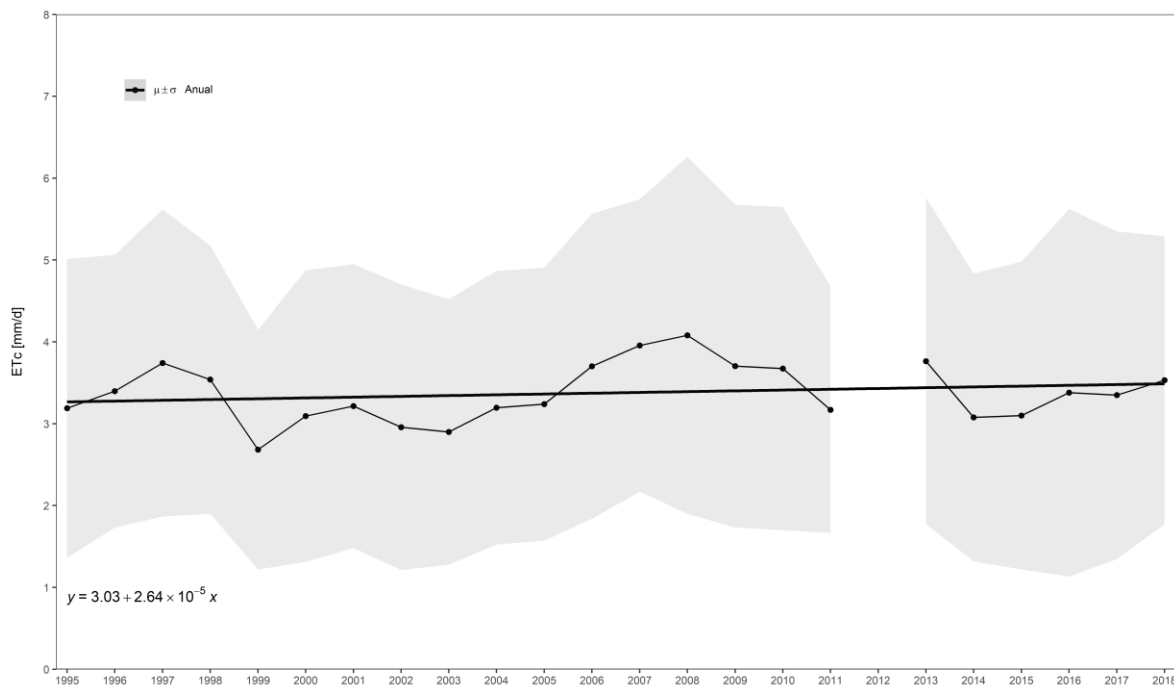




Figura 4. Serie anual de ETc media.

Los valores mensuales medios de ETc, muestran un comportamiento monomodal, concentrando los valores más altos en el periodo de marzo a junio y menores de septiembre a enero (fig. 5).

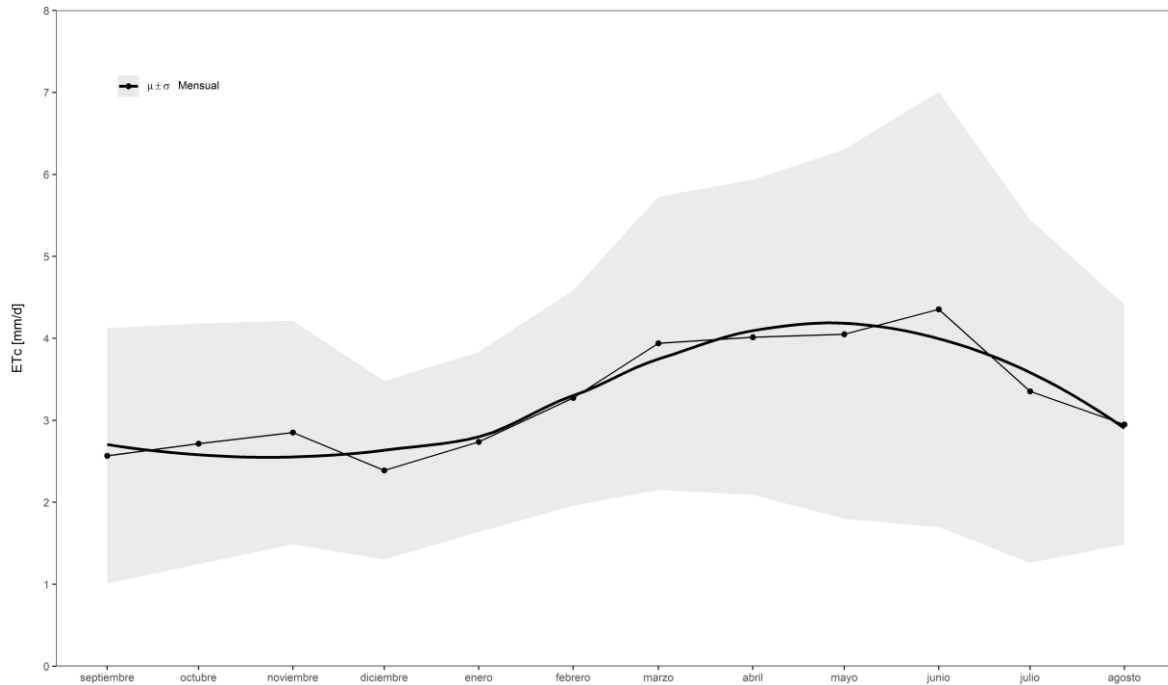


Figura 5. Serie mensual de ETc media.

El análisis mensual muestra al mes de junio como el periodo de mayor ETc en el año, con 4.14 [mm/d], mientras el mes de diciembre el de menor valor con 2.24 [mm/d]. El volumen mensual requerido por hectárea se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Volumen medio mensual requerido para la zona de estudio.

Mes	Volumen promedio requerido [m ³ /día/ha]
Enero	25.55
Febrero	30.62
Marzo	37.03
Abril	37.45
Mayo	37.60
Junio	41.45
Julio	30.98
Agosto	27.58
Septiembre	24.09
Octubre	25.77
Noviembre	26.60
Diciembre	22.44



Conclusiones

Se elaboró una base de datos con imágenes satelitales *LANDSAT* (5,7,8) junto a un modelo de balance de energía (Modelo A) que incorporó la información de cuatro estaciones meteorológicas cercanas al distrito 075 - El Fuerte, al norte del estado de Sinaloa.

Se efectuó un análisis histórico de la ETc a escala temporal: mensual y anual. El mes de junio fue el periodo de mayor ETc en el año, con 4.14 [mm/d], mientras el mes de diciembre el de menor valor con 2.24 [mm/d], lo cual implica distintos requerimientos hídricos de cultivo durante el año (Tabla 1). El comportamiento anual del parámetro presentó su mínimo en el año 1999 con 2.68 [mm/d] y máximo en el año 2008 con 4.08 [mm/día].

Estos resultados indican que los modelos de balance de energía alimentados con información de estaciones climatológicas cercanas a una zona agrícola y de sensores remotos satelitales, representan una alternativa viable para estimar la variabilidad espacial de la ETc con adecuada precisión; esta metodología podría ser utilizada en un futuro como una herramienta de apoyo en la toma de decisiones y en la formulación de políticas de gestión de recursos hídricos más eficientes.

Referencias Bibliográficas

- Allen, R., Tasumi, M. y Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), p.380-394.
- Bastiaanssen, W. G. M. (1995). Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. Tesis Doctoral, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Países Bajos.
- Elhaddad, A., y Garcia, L. A. (2008). Surface Energy Balance-Based Model for Estimating Evapotranspiration Taking into Account Spatial Variability in Weather. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(6), p.681-689.
- Gordillo-Salinas, V. M., Flores-Magdaleno, H., Tijerina-Chávez, L., Arteaga-Ramírez, R. (2014). Estimation of evapotranspiration using energy balance and satellite images. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(1), p.143-155.
- INIFAP (2016), Base de datos - Climatológica, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México.



- Johnson, L. F., y Trout, T. J. (2012). Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. *Remote Sensing*, 4(2), p.439–45.
- Kiptala, J., Mohamed, Y., Mul, M., & Van der Zaag, P. (2013). Mapping evapotranspiration trends using MODIS and SEBAL model in a data scarce and heterogeneous landscape in Eastern Africa. *Water Resources Research*, 49(12), p.8495-8510.
- Li, Z., Liu, X., Ma, T., Kejia, D., Zhou, Q., Yao, B., y Niu, T. (2013). Retrieval of the surface evapotranspiration patterns in the alpine grassland-wetland ecosystem applying SEBAL model in the source region of the Yellow River, China. *Ecological Modelling*, 270, p.64–75.
- Olmedo, G. F., Ortega-Farías S., De la Fuente-Sáiz D., Fonseca-Luego D., y Fuentes-Peñailillo F., (2016). water: Tools and Functions to Estimate Actual Evapotranspiration Using Land Surface Energy Balance Models in R. *The R Journal*, 8(2), p.352–369.
- QGIS Development Team (2018). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. LUR: <https://www.R-project.org/>.
- Roerink, G. J., Su, Z., y Menenti, M. (2000). S-SEBI: a simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and chemistry of the earth. Part B: hydrology, oceans and atmosphere*, 25(2), p.147-157.
- SMN (2016). Normales climatológicas 1981 - 2010, Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua, México.
- Su Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1), p. 85–99.
- USGS (2018). [En línea]. U.S. Geological Service, Fecha de consulta: 2017 - 2018, LUR: <https://landsat.usgs.gov/>.
- WaterWatch-CONAGUA (2005). Mapping Groundwater in Sonora State, Mexico (2004-2005). Contratista: CONAGUA, Países Bajos, Agosto-2005.