

ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN Y COEFICIENTE DE CULTIVO DE HIGUERA PARA UNA ZONA ÁRIDA, USANDO IMÁGENES SATELITALES Y DATOS DE REANÁLISIS

Sergio Iván Jiménez Jiménez^{1*}; José Alberto Urrieta-Velázquez¹; Hilario Macías Rodríguez¹; Mariana de Jesús Marcial Pablo¹

¹INIFAP-CENID RASPA Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Margen Derecha Canal Sacramento km 6.5, Zona Industrial, C.P. 35140, Gómez Palacio, Durango, México.

Correo electrónico: jimenez.sergio@inifap.gob.mx (*Autor de correspondencia)

Resumen

La higuera es un cultivo emergente debido a su demanda en el mercado, sin embargo, en las zonas áridas del norte de México, son pocas las investigaciones que abordan sus necesidades hídricas basadas en condiciones locales, en este sentido, este trabajo, hace un primer acercamiento a la estimación de los coeficientes de cultivo de la higuera usando datos satelitales e información *in situ* para una zona árida del norte-centro de México. Para determinar la Evapotranspiración (ET) se empleó el modelo de balance de energía SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) en conjunto con datos de reanálisis, mientras que, la Evapotranspiración de referencia (ET₀) se obtuvo mediante datos observados de una estación meteorológica dentro del área de estudio. Como resultado, se obtuvo que el coeficiente de cultivo para una higuera de 3 años fue máximo de 0.77 para la zona de estudio.

Palabras claves: GLDAS, NLDAS, RTMA, CFSv2, SEBAL.

Introducción

El clima es un factor importante que permite determinar en cierto grado los requerimientos hídricos de los cultivos; las higueras toleran condiciones más secas que la mayoría de los árboles frutales y es un cultivo frutal atractivo para las zonas áridas, a pesar de ello no existen muchas investigaciones acerca de los coeficientes de cultivos de higuera, debido a que es más práctico emplear métodos indirectos como tanque evaporímetros para programar las necesidades de riego del cultivo. Sin embargo, es conveniente la calibración de métodos locales para determinar sus necesidades hídricas, ya que el exceso de agua puede provocar un crecimiento vegetativo excesivo a expensas de la calidad de la fruta y un suelo húmedo hace que la fruta sea grande y acuosa y propensa a pudriciones y marchitamientos (Flaishman, et al., 2014).

En este sentido, el objetivo de este trabajo fue determinar el coeficiente de cultivo de la higuera, de tal manera que se puede llevar una calendarización del riego de acuerdo a las condiciones climáticas de la zona. Para ello, se emplearon imágenes satelitales Landsat 8 y 9 en conjunto con el modelo SEBAL para estimar la ET del cultivo y mediante una estación meteorológica se calculó la Evapotranspiración de referencia (ET_0).

Materiales y Métodos

Zona de estudio

La zona de estudio se encuentra en el municipio de Parras de la Fuente, Coahuila; es una parcela de 40 has, con cultivo de higuera de 3 y 2 años variedad Black Misión, tiene un sistema de riego de 4 lph con un gotero por planta. La densidad de población de 3,000 higueras por has.

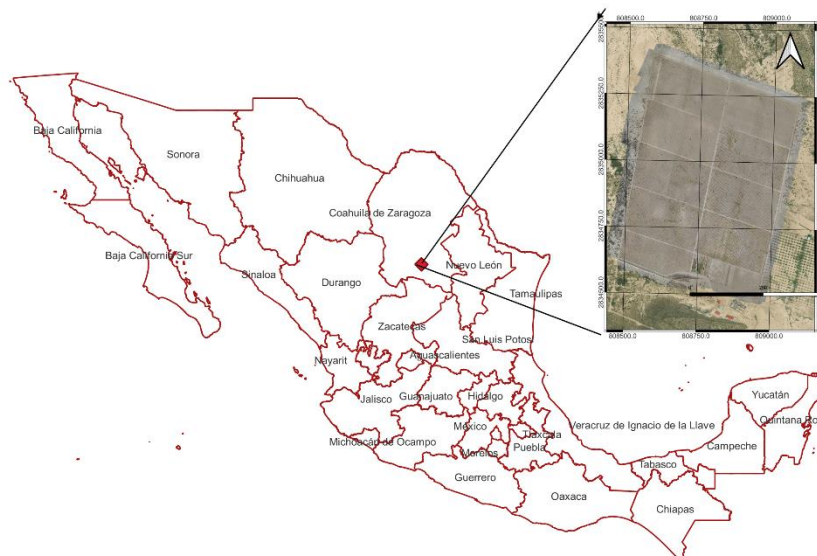


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio

El clima predominante se clasifica como BWhw, que corresponde a muy árido, semicálido, según la clasificación de Köppen modificado por Enriqueta García (García, 2004). La textura del suelo es principalmente franco arenoso.

Evapotranspiración de referencia con datos de reanálisis

La Evapotranspiración del cultivo (ET_c , Ecuación 1) se estima comúnmente considerando la evapotranspiración de referencia (ET_0) y el coeficiente de cultivo (K_c). La primera se puede calcular usando el manual 56 de la FAO (Allen et al., 2006), siendo el método de Penman Monteith (Ecuación 2) el más usado por su buena precisión para diferentes condiciones climáticas y regiones.

$$ET_c = K_c * ET_0 \quad (1)$$

$$ET_{0-PM} = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (2)$$

Dónde: R_n radiación neta en la superficie del cultivo ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); G flujo del calor de suelo ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); e_s presión de vapor de saturación (kPa); e_a presión real de vapor (kPa); $e_s - e_a$ déficit de presión de vapor (kPa); Δ pendiente de la curva de presión de vapor ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$); γ constante psicrométrica ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$); u_2 velocidad del viento ($m \cdot s^{-1}$). Para intervalos de tiempo diarios, los valores de G son relativamente pequeños y, por lo tanto, el termino es despreciado.

En este sentido, se descargó información de evapotranspiración de referencia de una estación DAVIS PRO PLUS instalada dentro de la huerta, la fecha de la instalación fue el 21 de febrero del 2022 y actualmente registra información cada 30 minutos, por tanto, para obtener la ET_0 de manera diaria, se sumó la ET_0 de cada intervalo durante cada día, algunos datos promediados por día juliano se muestran en la Figura 2.

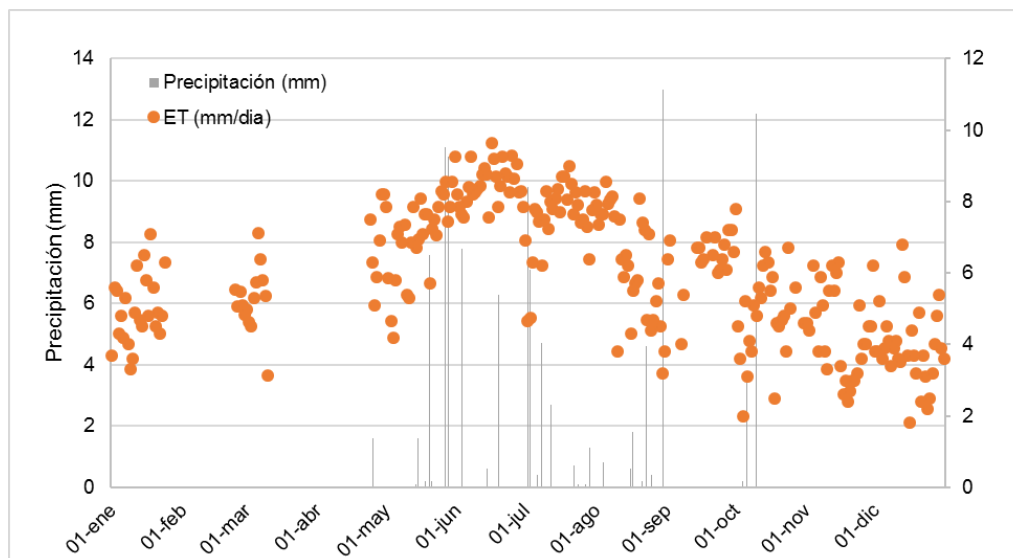


Figura 2. Valores promedios de Precipitación y Evapotranspiración registradas en la estación meteorológica Davis.

Con la finalidad de calibrar variables de datos de reanálisis para que se puedan emplear en regiones cercanas que no cuenten con estaciones meteorológicas, en un primer paso, se evaluaron cuatro bases de datos, entre ellos están: Climate Forecast System version 2 (CFSv2), Global Land Data Assimilation System (GLDAS), North American Land Data Assimilation System phase 2 (NLDAS) y Real-Time Mesoscale Analysis (RTMA). Sus principales características se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 1. Resoluciones y cobertura de conjuntos de datos de reanálisis evaluados.

Base de datos	Resolución			Cobertura	Cobertura espacial	ID in GEE
	Espacial (km)	Espacial (°)	Temporal (hr)			
CFSv2	~22 latitud	~0.2	6	1979 - presente	Global	NOAA/CFSV2/FOR6H
GLDAS 2.1	~28	1/4	3	2000 - presente	Global	NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H
NLDAS-2	~14	1/8	1	1979 - presente	Contiguo a Estados Unidos	NASA/NLDAS/FORA0125_H002
RTMA	2.5	1/24	1	2015-06-18-presente	Contiguo a Estados Unidos	NOAA/NWS/RTMA

De los cuatro conjuntos de datos seleccionados, dos son de cobertura global y dos de cobertura regional (Norteamérica). Los de cobertura regional brindan datos con resolución espacial y temporal más finas, aunque una alta resolución de los datos no necesariamente indica alta precisión como se encontró en Blankenau, Kilic, & Allen, (2020) en un estudio para Estados Unidos. La descarga de los datos de reanálisis se llevó a cabo desde Google Earth Engine para el mismo período de datos de las estaciones meteorológicas y se analizó el error usando las ecuaciones 3 y 4.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (V_{e,i} - V_{o,i})^2}{n}} \quad (3)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_{o,i} - \bar{V}_o)(V_{e,i} - \bar{V}_e)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{o,i} - \bar{V}_o)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{e,i} - \bar{V}_e)^2}} \right]^2 \quad (4)$$

Donde V_o es el valor medido u observado, V_e es el valor estimado (para este caso los extraídos de los datos de reanálisis); i es el día analizado y n es el número de valores o días analizados.

Evapotranspiración

Se obtuvo la ET usando el modelo de balance de energía SEBAL, para lo cual se modificó el código en Google Earth Engine de GEESEBAL (Laipelt et al., 2021), donde los datos de reanálisis que se emplearon fueron los que mejor desempeño mostraron. Para ello, se aplicó el modelo en más de 30 imágenes Landsat 8 y 9 disponibles desde marzo del

2022 al presente. Las imágenes que se seleccionaron tuvieron las condiciones de menos de 30 % de nubosidad, en algunos meses se pudieron obtener hasta 3 imágenes y en otro solamente uno.

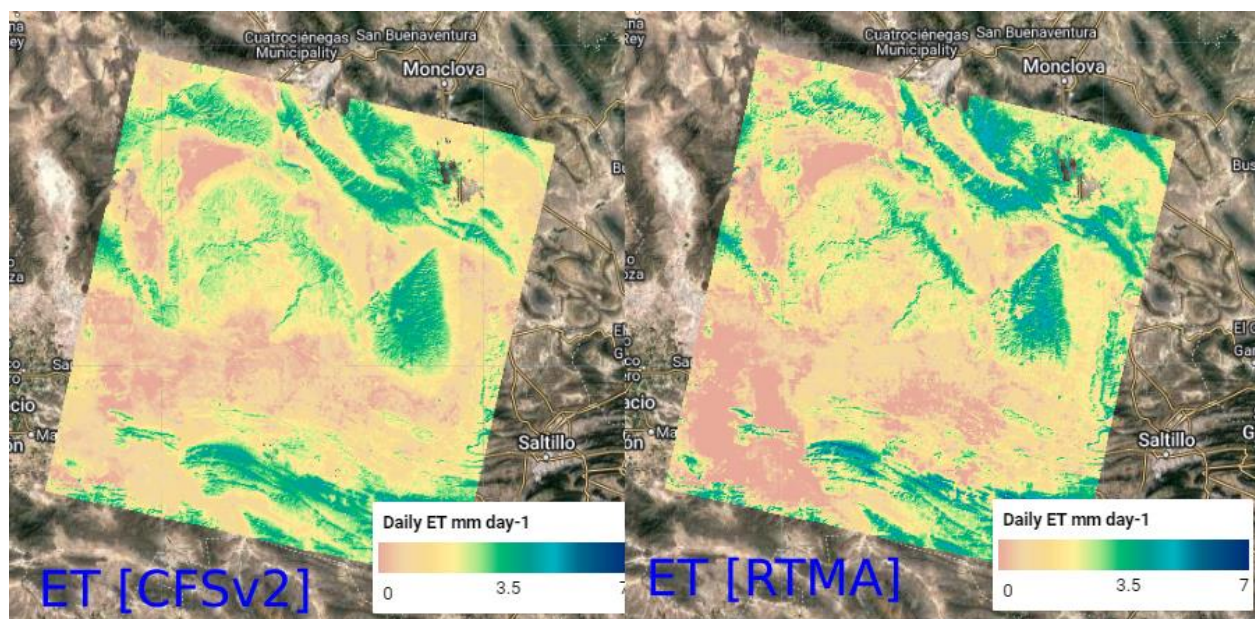


Figura 3. Mapa de ET dependiendo de los datos de reanálisis empleado para la zona árida.

GeeSEBAL selecciona los miembros finales fríos y calientes utilizando una versión simplificada adaptada de la metodología automatizada de METRIC, para la selección de dichos pixeles, emplea una población de miembros candidatos basada en cuantiles de estimaciones de sensores remotos de la temperatura y *NDVI*, con el objetivo de lograr una calibración interna consistente para aplicaciones de series temporales (Laipelt et al., 2021). En este sentido, se probaron diferentes combinaciones a fin de obtener valores consistentes en todas las imágenes empleadas.

Estimación de *Kc*

En lo que respecta al seguimiento del riego, la mayoría de los trabajos usan como criterio para determinar los requerimientos hídricos, un cierto porcentaje de la Evaporación del tanque tipo “A” ya que es uno de los métodos más sencillos para obtener la ET_0 , algunos de estos trabajos que se encuentran en la literatura son (Cuadro 2). Sin embargo, son pocos los que emplean el concepto de *Kc* en la calendarización del riego.

Cuadro 2. Manejo del riego reportados en la literatura para la higuera.

Referencia	Requerimientos hídricos	Clima	Nota
Tapia et al., 2003	50 % de la ET_c ; $K_c=0.75$ 0.17 %* Evaporación (EV) Tanque tipo A	Bsk*: estepa con alta sequedad atmosférica y frío, con 15,2°C de temperatura media anual	Marco de plantación: 6 x 4 m. Higueras de 3 años. País: Chile Variedad: Brown Ischia, Brown Turkey, Kadota, Kennedy, Larga de Burdeos y Royal Vineyard.

Referencia	Requerimientos hídricos	Clima	Nota
Hernández et al., (1994)	0.75* EV tanque tipo A	Aw*: Sabana con una temperatura media anual de 25° C y una precipitación total anual de 1330 mm. Cálido todo el año, con estación seca	Marco de plantación: 3 x 2 m. Higueras de 3 años. País: Brasil Variedad: Roxode-Valinhos
Assaf (2001)	0.3-0.4 * EV tanque tipo A	Árido	País: Israel Marco de plantación: 4,5 y 5 m entre hileras y entre 3 y 4 m entre árboles
Andrade et al., (2014)	Kc=0.71 intervalo de riego de 2 días; Kc=0.51 intervalo de riego de 4 días.	Aw*	Marco de plantación 3 x 2 m. Higueras de 3 años. País: Brasil Variedad: Roxo de Valinhos Suelo: Franco arcilloso arenoso y Arena arcillosa
Olitta et al., (1979)	Kc= 0.47		
(Rivera-González et al., 2019)	Kc (0.22 -1.10)		Marco de plantación: 2.5 x 2 m. Higuera de 4 años País: México, región lagunera

Actualmente, el cultivo se está manejando tomando en cuenta los Kc encontrados por Andrade *et al.*, (2014) como se muestra en el Cuadro 3, sin embargo, se calcularon los valores de Kc tomando en cuenta la ET derivado de las imágenes satelitales y los valores de ETo diarios derivados de observados de las estaciones meteorológicas (Ecuación 5), en este sentido, se está considerando que con las condiciones de manejo del cultivo no se somete a estrés.

Cuadro 3. Valores de ETc mensuales para el manejo actual del cultivo de higueral. Los valores promedio de ET fueron de la estación meteorológica instalada en campo.

Mes	ETo promedio (mm/día)	Precipitación (mm/mes)	1-2 años				3 Años			
			Kc	ETc (mm/día)	RR (litros)	RR (hr)	Kc	ETc (mm/día)	RR (litros)	RR (hr)
Enero	7.10	0								
Febrero	5.53	0	0.44	2.43	3.94	0.99	0.71	4.15	6.72	1.68
Marzo	7.11	0	0.44	3.13	5.07	1.27	0.71	5.33	8.64	2.16
Abril	8.20	1.6	0.44	3.61	5.85	1.46	0.71	6.15	9.97	2.49
Mayo	9.25	31.6	0.44	4.07	6.60	1.65	0.71	6.94	11.24	2.81
Junio	9.65	14.7	0.44	4.25	6.88	1.72	0.71	7.24	11.73	2.93
Julio	9.00	26.9	0.44	3.96	6.42	1.60	0.71	6.75	10.94	2.73
Agosto	8.55	21.4	0.44	3.76	6.10	1.52	0.71	6.41	10.39	2.60
Septiembre	7.20	0	0.44	3.17	5.13	1.28	0.71	5.40	8.75	2.19
Octubre	7.80	15.8	0.44	3.43	5.56	1.39	0.71	5.85	9.48	2.37

Noviembre	6.30	0	0.4 4	2.77	4.49	1.12	0.7 1	4.73	7.66	1.91
Diciembre	6.80	0								

$$Kc = \frac{ET_{GeeSEBAL}}{ET_{Estación Meteorológica}} \quad (5)$$

Resultados y Discusión

Con base en el análisis de los parámetros de error de la ET_0 , el conjunto de datos RTMA fue el que brindó menores valores de RMSE y mayores valores de R^2 , mostrando una R^2 de 0.84 y un RMSE de 0.78 mm/día (Figura 4). Aunque estos datos muestren valores de RMSE menores a 1 mm/día, es conveniente seguir el monitoreo de las variables de ET_0 para considerar más años en el análisis del error. Estos errores con respecto a datos observado, se debe principalmente a las velocidades de viento (u_2) mayores que se presentan en estas zonas y a la alta sensibilidad que tiene la ET_0 a la u_2 en regiones áridas y muy áridas (Jiménez-Jiménez, 2021). En estas zonas el flujo de viento muy probablemente reemplaza el aire húmedo con aire seco muy rápidamente, y causa un aumento en ET_0 en comparación con otras zonas (Debnath et al., 2015).

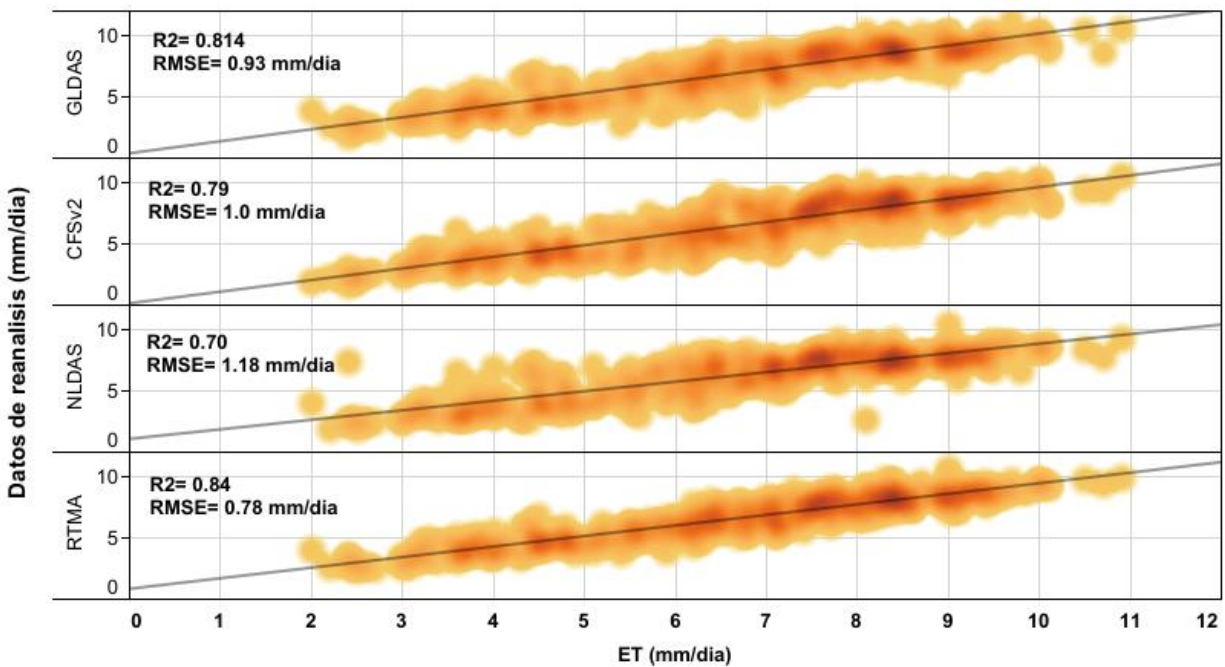


Figura 4. Evaluación del error de los datos de reanálisis en la estimación de la Evapotranspiración de referencia.

Con los valores de RTMA en conjunto con SEBAL y los de la estación meteorológica se pudo obtener valores de Kc promedios mensuales, donde, para la higuera de 3 años el mes de mayo presentó el mayor Kc , que es de 0.77. Estos valores están influenciados por las lluvias que se presentaron en la segunda quincena del mes, donde se encontraron

valores de ET de 6.12 mm/día, mientras que en el mes de marzo se encontraron valores de Kc de 0.2, esto ocurre después de que el cultivo sale de dormancia. Rivera-González et al., (2019) determinaron valores de Kc mayores a 1 para cultivos de 4 años, lo cual es alto comparado a nuestros resultados, sin embargo, es conveniente seguir el monitoreo del cultivo para observar su comportamiento en los próximos ciclos. Aunado a ello es importante que se mida en campo la ET para tener cierta calibración en las modelos SEBAL, ya que se sabe que con una calibración insitu se podrían tener valores más reales.

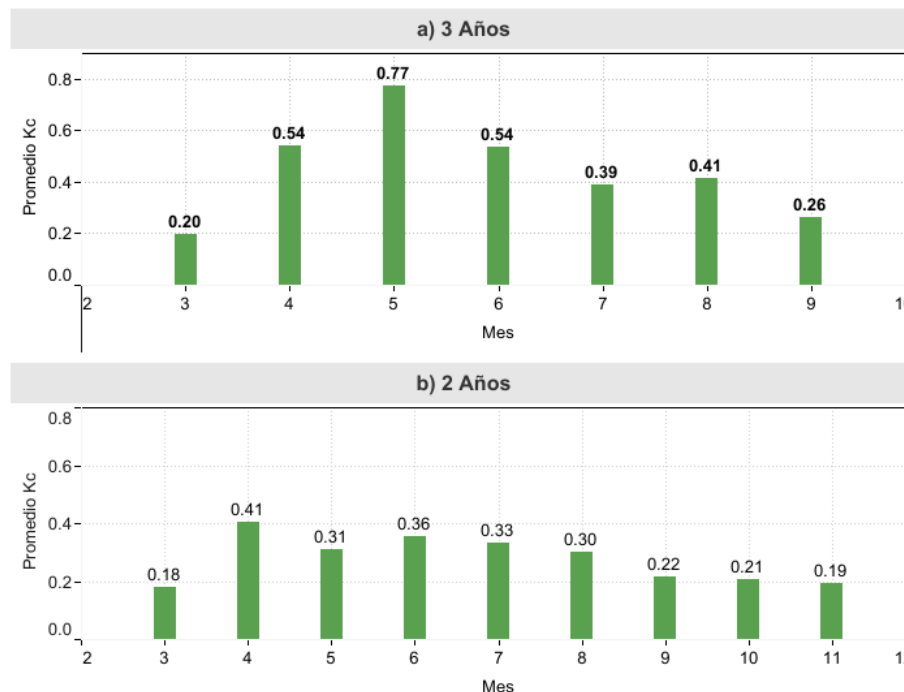


Figura 5. Coeficiente de cultivo estimados mediante el modelo SEBAL y valores de ET_o observados en la estación meteorológica.

En base al calendario de riego mostrado en el Cuadro 3, si se usaran los coeficientes de cultivo encontrados en este documento, la higuera ocuparía en la zona de estudio un aproximado de 960 mm/año.

Conclusiones

En este documento se presenta un avance en el cálculo del coeficiente de cultivo de la higuera en una zona árida, donde se emplean imágenes satelitales y datos de reanálisis, sin embargo, hace falta una calibración y validación local más robusta que podría apoyarse con sensores de humedad. De esta manera se tendría los valores calibrados de Kc para la zona, que ayudara a una estimación de la evapotranspiración más precisa, para una mejor gestión del riego y al ahorro del agua.

Referencias Bibliográficas

- Assaf, R. 2001. Sélection des varietes locales et techniques de culture du figuier en Israel. *Fruits*. 56 (2): 101-121.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. In *Estudio Fao Riego Y Drenaje*. FAO. <https://doi.org/M-56>
- Andrade, I., Carvalho, D., Almeida, W., Gonçalves, J., Duarte, L. 2014. Water requeriment and yield of fig tree under different drip irrigation management. *Engenharia Agricola*. V. 34. pp: 17-27.
- Blankenau, P. A., Kilic, A., & Allen, R. (2020). An evaluation of gridded weather data sets for the purpose of estimating reference evapotranspiration in the United States. *Agricultural Water Management*, 242(2020), 109376. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106376>
- Debnath, S., Adamala, S., & Raghuvanshi, N. S. (2015). Sensitivity Analysis of FAO-56 Penman-Monteith Method for Different Agro-ecological Regions of India. *Environmental Processes* 2:4, 2(4), 689–704. <https://doi.org/10.1007/S40710-015-0107-1>
- Flaishman, M. A.; V. Rodov; E. Stover. 2008. The fig: botany, horticulture, and breeding. *Horticultural Reviews*. 34: 113-196
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación köppen. In *Instituto de Geografía-UNAM*.
- Hernández, F.B.T., Susuki, M.A., Buzetti, S., y Correa, L. S. 1994. Resposta da figueira (ficus carica l.) Ao uso da irrigação e nitrogênio na região de ilha solteira. *Eng. Agricola*, 16 (2): 22-30.
- Jiménez-Jiménez, S. I., Ojeda-Bustamante, W., Inzunza-Ibarra, M. A. & Marcial-Pablo, M. J. (2021). Analysis of the NASA-POWER system for estimating reference evapotranspiration in the Comarca Lagunera, Mexico. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 13(2), 201-226. <http://dx.doi.org/10.5154/r.inagbi.2021.03.050>
- Laipelt, L., Henrique Bloedow Kayser, R., Santos Fleischmann, A., Ruhoff, A., Bastiaanssen, W., Erickson, T. A., & Melton, F. (2021). Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178, 81–96. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2021.05.018>
- Olitta, A.F.; Sampaio, V.R.; Barbin, D. Estudo da lâmina e frequência de irrigação por gotejo na cultura do figo. *O Solo*, Piracicaba, v.71, p.9-22, 1979.
- Rivera-González, M., Jiménez-Jiménez, S. I., Puente-Valenzuela, C., Sánchez-Cohen, I., & Macías-Rodríguez, H. (2019). Déficit hídrico inducido para higuera (*Ficus carica L*) en alta población y riego por goteo. *Agrofaz – Journal of Environmental and Agroecological Sciences, Especial*, 18–27. [http://www.agrofaz.mx/index.php/agrofaz/issue/view/4/Déficit hídrico inducido para higuera %28Ficus carica L%29 en alta población y riego por goteo](http://www.agrofaz.mx/index.php/agrofaz/issue/view/4/Déficit_hídrico_inducido_para_higuera_%28Ficus_carica_L%29_en_alta_población_y_riego_por_goteo)