

PROCESAMIENTO EN LA NUBE PARA LA ESTIMACIÓN Y MONITOREO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LOS CULTIVOS

Víctor Manuel Gordillo-Salinas^{1*}; Sergio Iván Jiménez-Jiménez²; Juan Arista-Cortes¹; Cecilia Téllez-Quintanar³, Jorge Andrés Castillo González¹

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

²INIFAP-CENID RASPA. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Margen Derecha Canal Sacramento km 6.5, Zona Industrial, Gómez Palacio, Durango. C.P. 35140. México.

³Unidad de Vinculación y Asuntos Internacionales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

gordillo.victor@hotmail.com - 5569646553 (*Autor de correspondencia)

Resumen

La evapotranspiración real (ET_a) de un cultivo es esencial para la planeación y el manejo del agua destinada a la producción de alimentos. Los modelos de balance energía basados en sensores remotos permite determinar la ET_a con alta precisión temporal y espacial. Actualmente, el uso de plataformas de cálculo en la nube optimiza el procesamiento de los algoritmos y de las imágenes satélites inherentes de estos modelos. En este trabajo de investigación se estimó la ET_a a través de las herramientas EEFlux y geeSEBAL los cuales usaron datos climáticos de reanálisis de la base de datos de clima en cuadrícula "North American Land Data Assimilation System" (NLDAS). Se utilizaron 11 imágenes del satélite Landsat 8 y 9, para cubrir el ciclo completo de un cultivo de 110 días de maíz forrajero bajo riego dentro del Distritos de riego 017 Región Lagunera. Los resultados muestran que las herramientas son capaces monitorear la dinámica de la ET_a durante todo el ciclo, con lo cual, se puede determinar la demanda de riego del cultivo con mayor precisión. Con base en las métricas estadísticas, se puede inferir la alta correlación entre EEFlux y geeSEBAL ($R^2=0.77$, RMSE= 1.2, d =0.9 y PBIAS = -7%) lo que nos indica que los productos derivados de estas dos fuentes son comparables.

Palabras claves: Evapotranspiración, EEFlux, geeSEBAL.

Introducción

A nivel mundial, la mayoría de los recursos de agua dulce disponibles se utilizan para fines de riego en la agricultura. Actualmente, muchas regiones del mundo enfrentan problemas extremos de escasez de agua, que pueden empeorar si no se manejan adecuadamente (Lakhiar et al, 2024).

En México, el mayor volumen concesionado para usos consuntivos, lo representa el uso agrupado agrícola (76.3%), asimismo, estas zonas de riego son las que producen alrededor del 40% de los alimentos para la población nacional, con lo cual, la solución al problema de la sostenibilidad del recurso hídrico, va más allá de una simple restricción del agua a este sector económico (Conagua, 2023).

Por otro lado, el cambio climático es una variable determinante que debe considerarse en las estrategias de futuro. Estas deben centrarse en garantizar la seguridad alimentaria bajo el enfoque de vulnerabilidad ante eventos extremos, apoyándose en el uso y/o desarrollo de herramientas y metodologías que permitan la prevención y el monitoreo continuo a una escala multitemporal y mutiespacial. La información generada de manera oportuna coadyuva en la toma de decisiones para la preservación del recurso hídrico y la planeación de acciones resilientes en la gestión del riego agrícola.

El cálculo de la evapotranspiración real (ETa) es una componente clave del ciclo del agua y es imprescindible en el cálculo del balance hídrico, los requerimientos de agua de riego, gestión de agua en la agricultura, modelación hidrológica, entre otros. Existen distintas técnicas para determinar la ETa con buena precisión como el enfoque de balance de humedad en el suelo, lisímetros, Eddy Covariance y Cintilómetros (Alsanjar y Cetin, 2024). Sin embargo, estas técnicas están limitadas a una lectura u observación local y tienen inconvenientes cuando se requiere el análisis de grandes superficies.

Modelos de balance de energía basados en sensores remotos han proporcionada una solución potencial para superar la problemática de confiabilidad en la estimación de ETa a nivel espacial y temporal.

Uno de los mayores retos que afrontan este tipo de modelos es la alta demanda de recurso computacional y un alto consumo de tiempo en el procesamiento. Asimismo, se requiere de distintas bases de datos (clima, vegetación, uso de suelo, etc) provenientes de diversas fuentes para alimentar a los modelos. La calibración y validación del modelo es necesario para obtener valores precisos de ETa. Por último, un componente medular para la adopción de estas herramientas por los usuarios no especializados, es la automatización o semiautomatización de los sistemas (Mhawej y Faour, 2020).

Bajo este contexto, algunos modelos de balance de energía han migrado a plataformas de computo en la nube como Google Earth Engine (GEE) (Allen et al., 2015; Mhawej y Faour, 2020; Mhawej et al., 2022; Senay et al., 2022). GEE es una plataforma para el procesamiento geoespacial que contiene varias bibliotecas con diferentes tipos de datos y colecciones de imágenes satelitales. Una de las ventajas es su capacidad de consultar, manipular y

automatizar los procesos en sus propios servidores, con lo cual, se prescinde de la adquisición de computadoras de alto rendimiento (Ferreira et al., 2022).

Dos modelos comunes que han sido migrados a la plataforma GEE para determinar la ETa son el Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration (METRIC)(Allen et al., 2007) , esta herramienta es nombrada “Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFlux) (Allen et al., 2015) y el modelo Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL)(Bastiaanssen, et al., 1998) llamado geeSEBAL (Laipelt et al., 2021). Los productos de los dos modelos han mostrado resultados satisfactorios al comparar con observaciones de campo para diferentes regiones del mundo y en distintos cultivos agrícolas (Alsanjar y Cetin, 2024).

La disponibilidad de estas plataformas de acceso libre permite a los usuarios contar con distintas fuentes para obtener la ETa. Sin embargo, debida a la naturaleza propia de los modelos y de los insumos que los alimentan, los resultados entregados por cada uno de ellos, pueden presentar diferencias, por lo cual, se requiere de un análisis estadístico comparativo que determine la existencia o ausencia de significancia estadística entre los productos.

Los objetivos del presente estudio fueron 1) monitorear cronológicamente la ETa de un cultivo maíz forrajero bajo riego establecido en la zona norte de México y 2) Comparar los resultados obtenidos para cada uno de los modelos de balance de energía.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en una parcela (25.862144, -103.21122) que se encuentra dentro del DR017 región lagunera (Figura1). La parcela tiene una superficie de 45 has, donde se sembró maíz forrajero el 16 de marzo del 2023 con una densidad de siembra de 100,000 plantas/has. El suelo predominante es arcilloso. Se dio seguimiento a la parcela durante el ciclo de desarrollo del cultivo de 110 días.

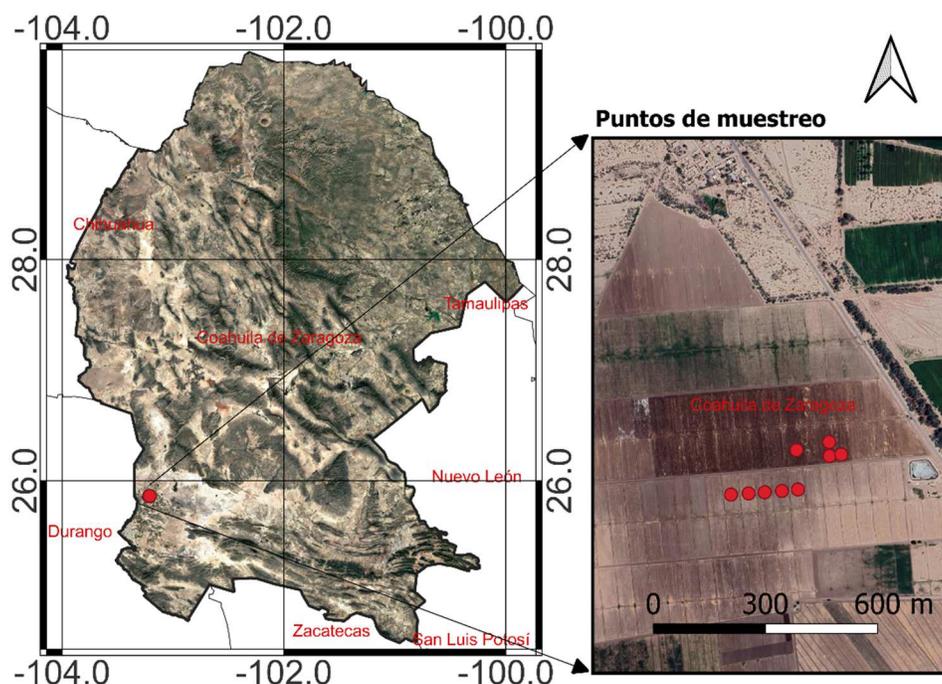


Figura 1. Ubicación de la parcela de estudio.

Datos de sensores remotos y clima

En el estudio se utilizaron 11 imágenes de la colección del satélite Landsat adquiridas directamente desde la plataforma de GEE, seis son imágenes Landsat-8 y cinco imágenes de Landsat-9 (Cuadro 1). Para asegurar imágenes de alta calidad se aplicó un filtro de nubosidad estableciendo un umbral máximo de 30%.

El monitoreo con estas imágenes correspondió al periodo del 11 de marzo del 2024 al 9 de julio del 2024. Con estas imágenes se cubrió el ciclo completo del cultivo para el área de estudio.

Cuadro 1. Imágenes Landsat disponibles para el monitoreo del ciclo completo del cultivo de maíz.

Fecha	Sensor	Nubosidad (%)
11-marzo-2024	Landsat-8	12
27-marzo-2024	Landsat-8	0
4-abril-2024	Landsat-9	0
20-abril-2024	Landsat-9	0
28-abril-2024	Landsat-8	0
14-mayo-2024	Landsat-8	0
22-mayo-2024	Landsat-9	0
30-mayo-2024	Landsat-8	0
7-junio-2024	Landsat-9	1
15-junio-2024	Landsat-8	1

9-julio-2024	Landsat-9	1
--------------	-----------	---

Las variables climáticas fueron obtenidas de la base de datos de clima en cuadrícula “North American Land Data Assimilation System” (NLDAS), esta colección presenta los datos a nivel horario y es usado para la calibración del balance de energía y para la integración de ETa entre las escenas para las fechas del paso del satélite. La ETr se determinó mediante la utilización de la ecuación de Penman-Monteith de la American Society of Civil Engineers (ASCE), para lo cual, se usaron de datos de radiación solar, velocidad del viento, humedad y temperatura del aire derivados de la base NALDS.

Modelos de balance de energía

Las plataformas EEFlux y geeSEBAL fueron usados en este trabajo de investigación para determinar la ETa. El algoritmo de los modelos correspondientes para cada plataforma tiene como base, el proceso de intercambio de energía entre la tierra y la atmosfera. Los insumos principales para el cálculo de la ETa son la información capturada dentro del rango del espectro del visible, infrarrojo cercano y el infrarrojo térmico derivados de imágenes satelitales, así como, de bases de datos climáticas (Huang et al., 2021).

La ETa se estimó como un residual del balance de energía (Allen et al., 2007), basado en la siguiente ecuación:

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$

Donde LE es el flujo de calor latente, Rn es la radiación neta, H es el flujo de calor sensible y G es el flujo de calor del suelo, todas las variables son expresados en unidades de W/m².

Los detalles sobre las ecuaciones y su fundamento físico son explicados en Allen et al. (2007) y Bastiaanssen, et al. (1998) para el modelo METRIC-EEFlux y geeSEBAL, respectivamente.

EEFlux es una versión automatizada del modelo METRIC que se encuentra hospedado en la plataforma GEE (<http://eeflux-level1.appspot.com/>) y es capaz de operar a nivel planeta, usa distintas fuentes de datos públicos de clima, características y uso de suelo y modelos de elevación digital (Kadam et al., 2021).

Las imágenes Landsat fueron procesadas con EEFlux versión 0.20.17 (accesado el 16-agosto-2024). Los productos descargados de la plataforma fueron la Fracción de la Evapotransporación de referencia (ETrF) y la ETa para las fechas del paso del satélite mencionadas en el Cuadro 1. La mecánica de la descarga es muy sencilla y muy intuitiva, ya que, solamente se definió el rango de tiempo de interés y la coordenada del área de estudio, esto último, simplemente arrastrando el pin rojo que se presenta en el mapa de la plataforma (Figura 2).

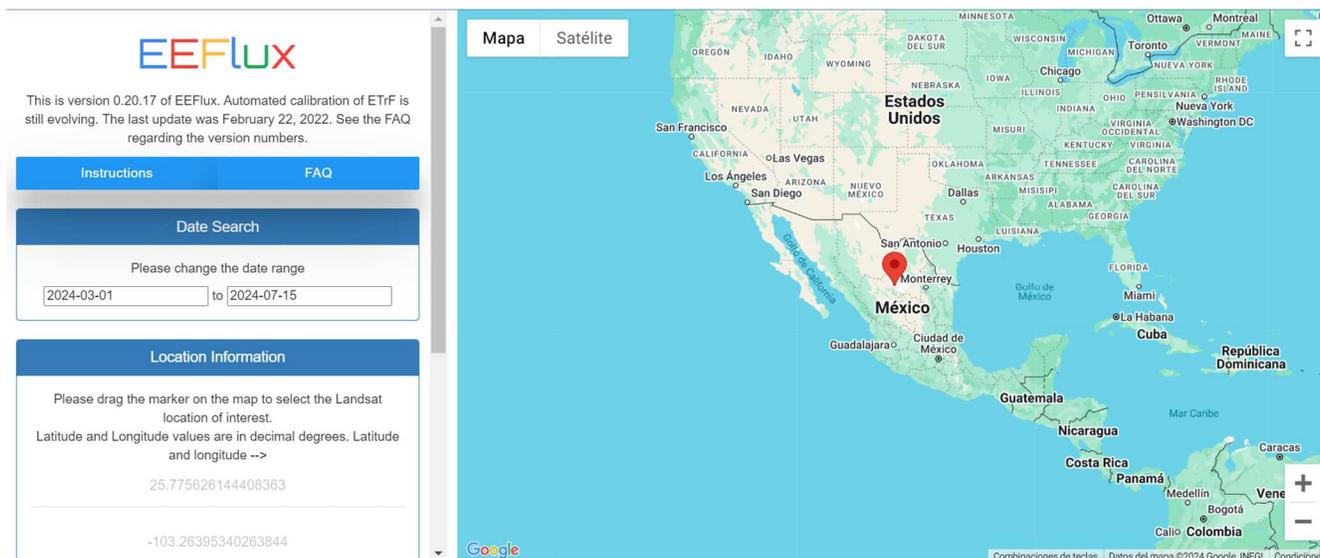


Figura 2. Interfaz principal de la plataforma EEFlux

Por otro lado, el código original y libre del modelo geeSEBAL (<https://github.com/et-brasil/geesebal>) fue modificado por Jiménez et al. (2023). Esta aplicación permite a los usuarios seleccionar un intervalo de fechas específicos y obtener una lista de imágenes Landsat haciendo clic sobre un punto específico sobre el mapa (Figura 3)

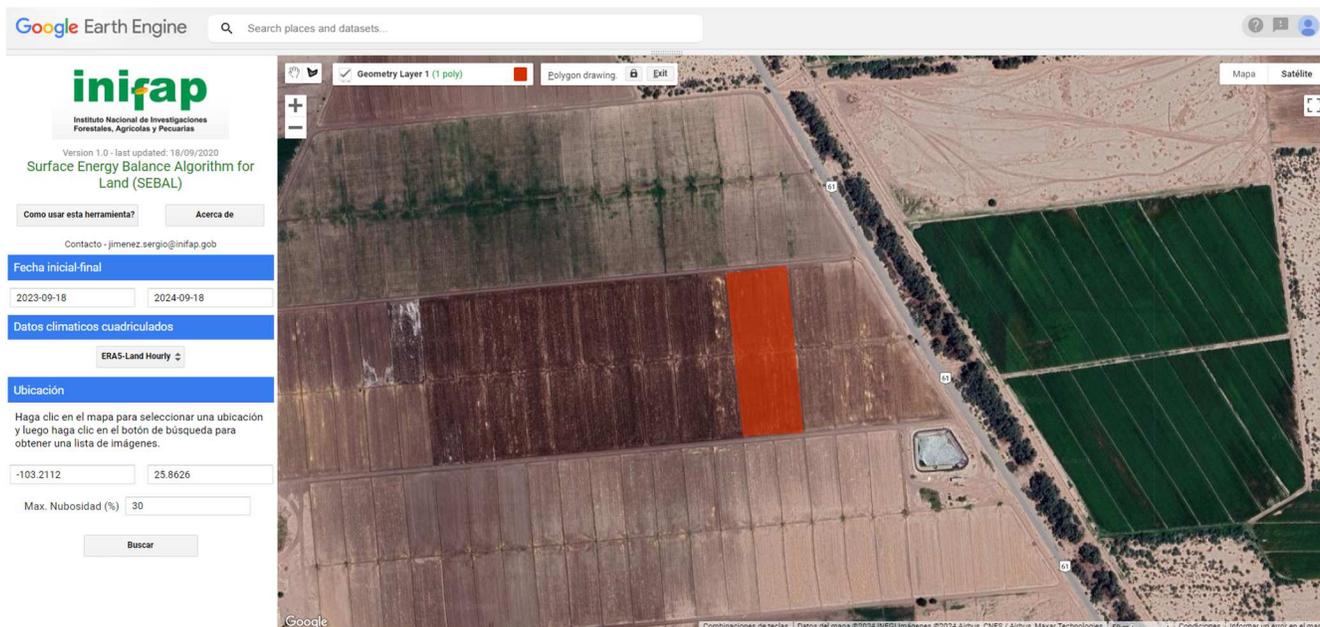


Figura 3. Interfaz de la aplicación geeSEBAL modificado por Jiménez et al. (2023).

Los dos modelos de balance de energía realizan una calibración usando un algoritmo estocástico automatizado para seleccionar candidatos de píxeles fríos y calientes. El píxel frío (húmedo) representa un área totalmente vegetada, mientras que, el píxel caliente denota superficies con área sin vegetación. El algoritmo por default selecciona candidatos del píxel

frio en función de los percentiles más altos de NDVI (5%) y los más bajos de Temperatura superficial (Ts) (20%) Por otro lado, el pixel caliente se selecciona en función de los percentiles NDVI más bajos (10%) y los más altos de Ts (20%).

Una de las mejoras al modelo geeSEBAL es la permitir a los usuarios poder cambiar los percentiles de la temperatura superficial (Ts) y el NDVI para la selección de los pixeles de anclaje (pixel frio y pixel caliente), con lo cual, se puede realizar un procedimiento de calibración automático del modelo (Laipelt et al., 2021).

En este modelo se usó la base de datos NLDAS descrita anteriormente, así como, las mismas imágenes de Landsat usadas en el modelo METRIC-EEFlux.

Métricas estadísticas

Para la evaluación del desempeño de los modelos y su comparación entre ellos, se usó la raíz del cuadro medio del error (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ETa_{geeSEBAL} - ETa_{EEFlux})^2}{n}} \quad (2)$$

Donde n es el número de valores de ETa, ETa_{EEFlux} es el valor de ETa estimada derivada de la plataforma EEFlux y $ETa_{geeSEBAL}$ es el valor de ETa estimado con el algoritmo geeSEBAL.

El RMSE es considerado como una concordancia perfecta cuando el valor es 0.

Se usó el índice de concordancia de Willmott (1982). El índice de concordancia de Willmot presenta valores entre 0 y 1, donde 1 indica una concordancia perfecta entre los modelos y 0 indica que no hay concordancia entre ellos.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ETa_{geeSEBAL} - ETa_{EEFlux})^2}{\sum_{i=1}^n (|ETa_{EEFlux} - \overline{ETa_{geeSEBAL}}| + |ETa_{geeSEBAL} - \overline{ETa_{geeSEBAL}}|)^2} \quad (3)$$

Donde $\overline{ETa_{geeSEBAL}}$ es el valor promedio de las ETa derivadas de geeSEBAL.

EL porcentaje de sesgo (PBIAS) mide la tendencia promedio de los valores de un modelo a ser mayores o menores que los valores del otro modelo.

El valor óptimo de PBIAS es 0, es decir, no hay sesgo entre los dos modelos comparados. Los valores positivos indican un sesgo de sobreestimación, mientras que los valores negativos indican un sesgo de subestimación del modelo. La función utilizada fue la siguiente:

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (ETa_{EEFlux} - ETa_{geeSEBAL})}{\sum_{i=1}^n ETa_{geeSEBAL}} \quad (4)$$

En este estudio, se aplicó un análisis de regresión lineal para evaluar la relación entre ETa_{EEFlux} y $ETa_{geeSEBAL}$. La comparación se realizó de manera gráfica a través de un diagrama de dispersión, asimismo, se incluyó un coeficiente de determinación (R^2), el cual se determinó como:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ETa_{geeSEBAL} - \overline{ETa}_{geeSEBAL})(ETa_{EEFlux} - \overline{ETa}_{EEFlux})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ETa_{geeSEBAL} - \overline{ETa}_{geeSEBAL})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (ETa_{EEFlux} - \overline{ETa}_{EEFlux})^2}} \right]^2 \quad (4)$$

Resultados y Discusión

El comportamiento temporal de la variable ETa para las dos plataformas utilizadas en esta investigación puede verse en la Figura 4. Las dos fuentes presentan un comportamiento similar a través del tiempo, sin embargo, se observa que $EEFlux$ estima valores mayores de ETa , por encima de 8 mm/día, asimismo, se tiene un valor promedio de 4.7 y 5.1 mm/día para $EEFlux$ y $geeSEBAL$, respectivamente. La desviación estándar de los valores de $EEFlux$ fue de 2.5 mm/día y para $geeSEBAL$ de 2.4 mm/día.

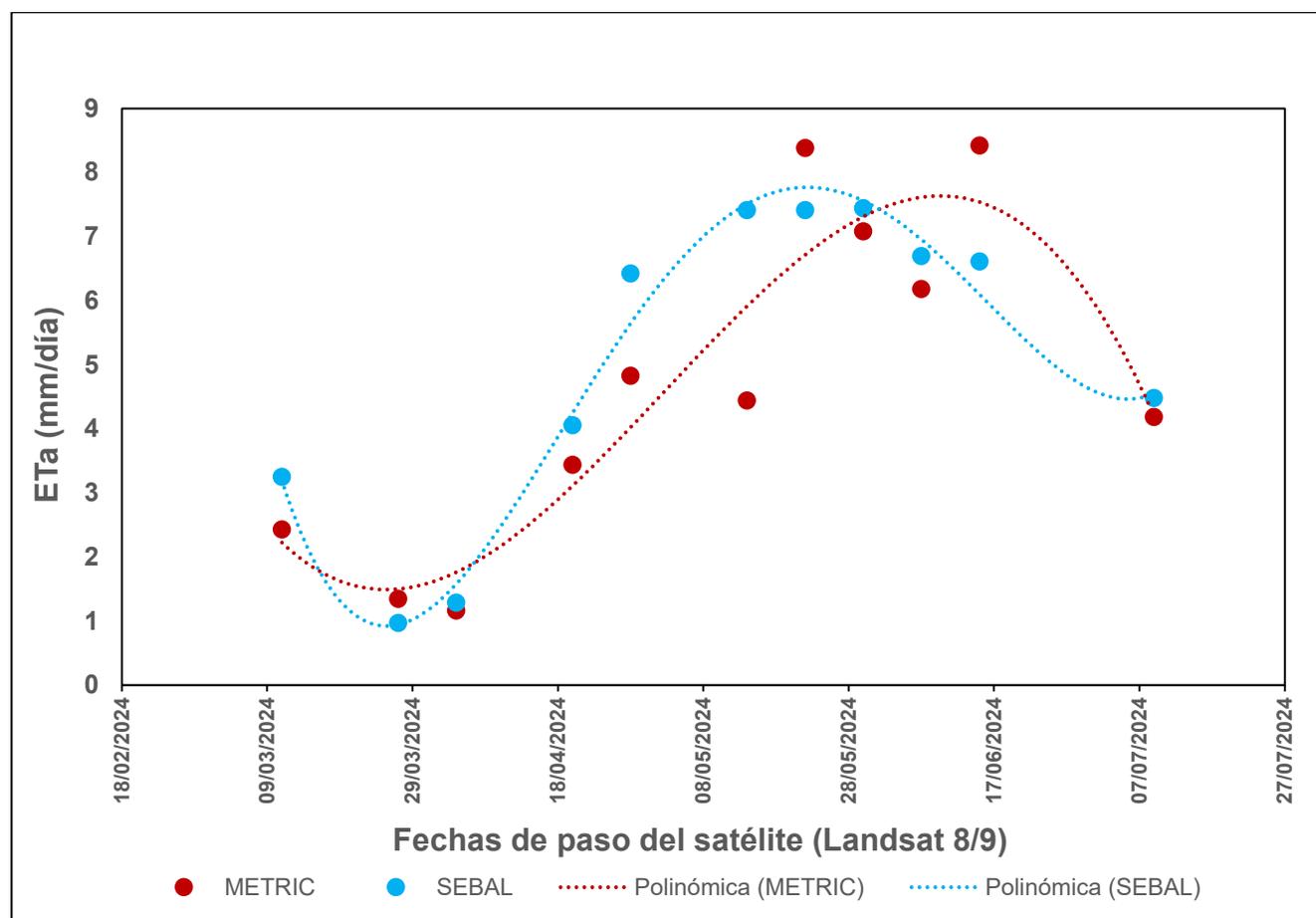


Figura 4. Evolución temporal de la ETa derivada de EEFlux y geeSEBAL.

Los resultados de las métricas estadísticas son expuestos en el Cuadro 2. El RMSE es la raíz del cuadrado medio del error, d es el índice de concordancia de Willmot y PBIAS es el porcentaje de sesgo.

Cuadro 2. Métricas estadísticas de la comparativa entre la ETa derivada de EEFlux y geeSEBAL.

RMSE (mm/día)	d (adimensional)	PBIAS (%)
1.25	0.92	-7.4

Los resultados mostraron un alto valor del índice de Willmott, lo que nos indica que los dos modelos tienen un alto nivel de concordancia en la estimación de la ETa.

Asimismo, se pudo observar que el modelo EEFlux subestima el valor de ETa al compararlo con el geeSEBAL. Esta subestimación coincide con los resultados reportados por Deepan (2022), el cual menciona que esta diferencia puede deberse a que el algoritmo SEBAL está completamente centrado en el fenómeno atmosférico a diferencia de METRIC, el cual, realiza una calibración con datos observados en tierra.

La comparación entre ETa_{EEFlux} y $ETa_{geeSEBAL}$ fue expresada en la Figura 5 a través de un diagrama de dispersión, con la finalidad de entender cómo un producto explica la variabilidad del otro. Se observa un buen ajuste a la línea 1:1, asimismo, es notorio que existe una diferencia entre las plataformas, para algunas fechas del paso del satélite, cuando se presentan valores de ETa por arriba de 6 mm/día.

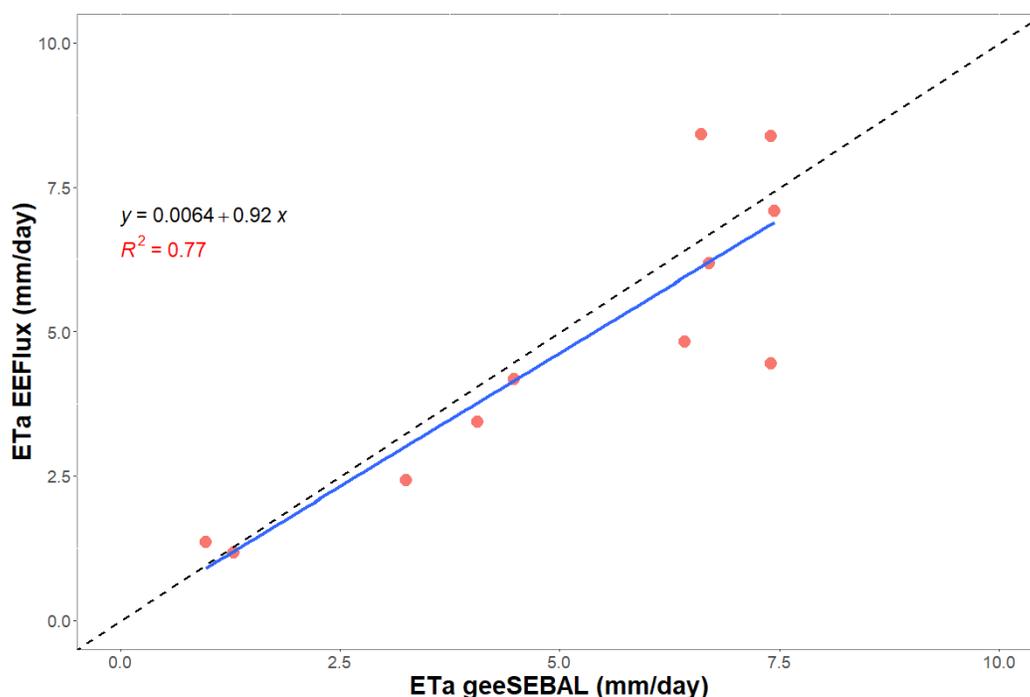


Figura 5. Comparación entre ETa de EEFlux y geeSEBAL para el área de estudio.

Aunque no se tienen valores de ETa de campo para validar cual modelo es el mejor, se puede observar que los dos modelos de las plataformas están muy bien relacionados, hecho que es evidente por el alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0.77$). Estos resultados son similares a lo reportado por Filgueiras et al. (2019) quienes evaluaron la ETa derivado de EEFlux y la ETa estimado por modelo SEBAL usando el software R y datos climáticos *in-situ* ($R^2 = 0.8$).

Conclusiones

La plataforma EEFlux y el algoritmo geeSEBAL como herramientas para la estimación de la ETa permiten monitorear puntualmente la dinámica de la demanda de agua durante el ciclo completo del cultivo de maíz. El entendimiento de la dinámica de la ET es necesario para mitigar los impactos de la escasez de agua de riego debido a la mayor demanda de producción de alimentos bajo escenarios de cambio climático.

Asimismo, el poder de computo en la nube con la plataforma Google Earth Engine, de manera cualitativa, demuestra la eficiencia en el procesamiento de los algoritmos y de las imágenes Landsat necesarias en cada modelo.

La presente investigación demuestra la alta correlación existente entre EEFlux y geeSEBAL usando datos climáticos de reanálisis, por lo tanto, se puede concluir que los mapas de ETa generados por cada una de las herramientas pueden usarse de manera confiable en el manejo del agua en la agricultura. Sin embargo, es necesario evaluar valores ETa estimados con los modelos de balance de energía haciendo uso de las bases de datos climáticos observados por estaciones meteorológicas cercanas al área de interés, con lo cual, se espera una mejor precisión en el cálculo de la ETa y compararlos con datos medidos de ETa en campo.

Referencias Bibliográficas

- Allen, R.G., M. Tasumi and R. Trezza. (2007). Satellite-based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) -- Model. *J. Irrig. and Drain. Engrg.* ASCE 133(4), 380-394.
- Allen, R.; Morton, C.; Kamble, B.; Kilic, A.; Huntington, J.; Thau, D.; Gorelick, N.; Erickson, T.; Moore, R.; Trezza, R.; Ratcliffe, I. C.; and Robison, C. (2015). "EEFlux: A Landsat-based Evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine". *Papers in Natural Resources.* 1482.
- Alsanjar, O., & Cetin, M. (2024). Comparison of actual evapotranspiration by the google earth engine evapotranspiration flux (EEFlux) to the METRIC model using remote sensing data and in-situ climate observations. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 85, p. 01073). EDP Sciences.
- Bastiaanssen, W. G., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, 212, 198-212.
- Conagua. (2023). Estadísticas del Agua en México 2023. Subdirección General de Administración del Agua. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html

- Deepan, R. (2022). Quantification of evapotranspiration using EEFLUX tool and comparison by empirical methods in maize (*Zea mays* L.) (Doctoral dissertation, Punjab Agricultural University, Ludhiana).
- Ferreira, A., Rolim, J., Paredes, P., & Cameira, M. D. R. (2022). Assessing Spatio-Temporal Dynamics of Deep Percolation Using Crop Evapotranspiration Derived from Earth Observations through Google Earth Engine. *Water*, 14(15), 2324.
- Filgueiras, R., Mantovani, E. C., Althoff, D., Ribeiro, R. B., Venancio, L. P., & dos Santos, R. A. (2019). Dynamics of actual crop evapotranspiration based in the comparative analysis of sebal and metric-eeflux. *Irriga*, 1(1), 72-80.
- Huang, D., Wang, J., & Khayatnezhad, M. (2021). Estimation of actual evapotranspiration using soil moisture balance and remote sensing. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45, 2779-2786.
- Jiménez, J.S.I;Urrieta, V.J.A.; Macías, R. H.; Marcial, P. M.J. (4-6 de octubre de 2023). Estimación de la evapotranspiración y coeficiente de cultivo de higuera para una zona árida, usando imágenes satelitales y datos de reanálisis. VII Congreso Nacional y I Congreso Internacional de riego, drenaje y biosistemas. Saltillo, Coahuila, México.
- Kadam, S. A., Stöckle, C. O., Liu, M., Gao, Z., & Russell, E. S. (2021). Suitability of Earth Engine Evaporation Flux (EEFlux) estimation of evapotranspiration in rainfed crops. *Remote Sensing*, 13(19), 3884.
- Laipelt, L., Kayser, R. H. B., Fleischmann, A. S., 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.
- Lakhiar, I. A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B., ... & Rakibuzzaman, M. (2024). A Review of Precision Irrigation Water-Saving Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints. *Agriculture*, 14(7), 1141.
- Mhaweji, M., & Faour, G. (2020). Open-source Google Earth Engine 30-m evapotranspiration rates retrieval: The SEBALIGEE system. *Environmental Modelling & Software*, 133, 104845.
- Mhaweji, M., Gao, X., Reilly, J., & Abunnasr, Y. (2022). SEBALIGEE v2: Global Evapotranspiration Estimation Replacing Hot/Cold Pixels with Machine Learning. *Authorea Preprints*.
- Senay, G. B., Friedrichs, M., Morton, C., Parrish, G. E., Schauer, M., Khand, K., ... & Huntington, J. (2022). Mapping actual evapotranspiration using Landsat for the conterminous United States: Google Earth Engine implementation and assessment of the SSEBop model. *Remote Sensing of Environment*, 275, 113011.
- Willmott C.J. (1984). On the evaluation of model performance in physical geography, *Spatial statistics and models*, 443460.