

Propuesta metodológica para estimar evapotranspiración real en el distrito de riego Tula Hidalgo México, usando percepción remota

Jorge Flores-Velázquez ^{1,*}, Monserrat Ramírez Martínez ¹, Francisco García ¹, Víctor Gordillo ²

¹ Posgrado en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillos. Carretera México Texcoco, Km 36.5 Montecillo, Texcoco, Estado de México. 56230

² Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Jiutepec Morelos. México

* Autor de correspondencia: jorgely@colpos.mx

Desarrollo Sustentable (Agricultura Sustentable)

Recibido: 2 de abril de 2025 Aceptado: 28 de junio de 2025 Publicado: 30 de noviembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.408>

Resumen: La gestión y administración del agua para uso agrícola en México es una actividad que aun puede mejorar la eficiencia en el uso del agua y con ello disponer de volúmenes de agua útil. El estado de Hidalgo, México recibe el agua tratada de la planta de tratamiento y se utiliza para abastecer la zona agrícola en tres distritos de riego. El objetivo fue estimar la evapotranspiración real de cultivo de maíz, usando METRIC Effluent de manera remota y comparar los resultados con el modelo Hargreaves-Samani en el Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo, México regada con aguas residuales. Se utilizaron imágenes de satélite Landsat 7 una para cada mes de enero a diciembre de 2019, para estimar evapotranspiración puntual con EEFlux y METRIC. Las imágenes obtenidas fueron comparadas con estimados con el modelo Hargreaves-Samani usando normales climatológicas. Los resultados son compatibles con ambas metodologías, por lo que se consideran alternativas viables para estimar evapotranspiración real y requerimientos de riego en cultivos. El modelo METRIC permite un seguimiento espacial en el monitoreo y discriminación de datos sobre la superficie terrestre y su practicidad de combinar con otras capas en herramientas espaciales. El Modelo Hargreaves-Samani que usa normales climatológicas es más estable durante el año, aunque su dificultad radica en las bases de datos. La metodología propuesta mediante percepción remota es una herramienta robusta no solo en la estimación de requerimiento de riego en zonas agrícolas, sino que una vez calculada y desplegada en un sistema de información geográfica, permite el monitoreo y gestión del recurso hídrico.

Palabras clave: Hargreaves-Samani, lamina de riego, METRIC, recurso hídrico

Methodological proposal to estimate evapotranspiration real in Tula, Hidalgo Mexico irrigation district using remote perception

Abstract: The management and administration of water for agricultural use in Mexico continues to be a central issue. The state of Hidalgo receives treated water from the third largest treatment plant in the world, which is used to irrigate crops in three irrigation districts. The **objective** of this work was to estimate the real evapotranspiration of corn crops, with the METRIC Effluent software remotely and compare the results with the Hargreaves-Samani model in the area of Hidalgo Mexico irrigated with wastewater. Landsat 7 satellite images were used to estimate point evapotranspiration with EEFlux and METRIC. To analyze the results, the Hargreaves-Samani model was used to estimate the same variable using normal climatologies. The results indicate that both methodologies are effective for estimating actual evapotranspiration and, consequently, for determining crop irrigation requirements. In addition, the METRIC model enables spatial monitoring and data discrimination on the Earth's surface, and is practical for integration with other layers in spatial analysis tools. The Hargreaves-Samani model, which relies on climatological normals, shows greater stability throughout the year; however, its limitation lies in the availability and quality of climate databases. In contrast, the proposed methodology using remote sensing is a robust tool not only for estimating irrigation requirements in agricultural areas, but also for facilitating the monitoring and management of water resources as the results can be visualized in a geographic information system

Keywords: Hargreaves-Samani, irrigation sheet, METRIC, water resource

Introducción

La agricultura de riego consume a nivel mundial el 69% del agua disponible útil (Martínez *et al.*, 2021). Entre los esfuerzos por reducir este volumen de agua, surge la importancia de estimar de manera precisa tanto de espacial como temporalmente la transpiración de los cultivos agrícolas (Allen *et al.*, 1998). La transpiración es una variable importante en el balance energético de la hoja y del estado hídrico de la planta. Este proceso comprende la evaporación del agua desde las células superficiales en el interior de los espacios intercelulares y su difusión fuera del tejido vegetal. Junto al intercambio de dióxido de carbono (CO₂), se determina la eficiencia de uso del agua de una planta. Las hojas pierden

agua a través de sus estomas como consecuencia de la actividad fotosintética de las células del mesófilo (Squeo y León, 2007).

La evapotranspiración real o de referencia (ET_o) se define como la cantidad de agua perdida por el complejo suelo-planta en las condiciones meteorológicas, edáficas y biológicas existentes; mientras que la evapotranspiración potencial (ET_p) es la máxima cantidad de agua capaz de ser perdida por una capa continua de vegetación que cubre todo el terreno, cuando la cantidad de agua suministrada al suelo es ilimitada (Ortiz y Chile, 2020). Aun cuando se reconoce que estos conceptos son diferentes, ambos indican cantidades máximas de agua perdida en favor de la atmósfera; por ello, en algunos estudios, han sido considerados como equivalentes (McKenney y Rosenberg, 1993; Henríquez-Dole *et al.*, 2014). La estimación de este valor también ayuda al manejo de recursos naturales, usos ecológicos y otras actividades de planeación (Villa-Nova *et al.*, 2007, Villaseñor y Soto, 2024). La evapotranspiración de referencia y evapotranspiración potencial son intercambiables, y su diferencia ($ET_p - ET_r$) es lo que se conoce como déficit hídrico o de riego. En agricultura se trabaja para que esta diferencia sea mínima, o nula lo que significaría que las plantas siempre tengan suficiente humedad en el suelo para evapotranspirar (Montaner y Sánchez, 1988).

Se han desarrollado metodologías para estimar la ET_r , la mayoría involucra datos del clima y del cultivo. Existe un interés por el uso de atmómetros para estimar la ET_o por ser una alternativa viable (Knox *et al.*, 2011) pero se requiere su calibración y validación local. El uso de atmómetros puede ser una herramienta viable para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) (Mendoza-Pérez *et al.*, 2019), pero a su vez se requiere de apropiada calibración, validación local, así como buena operación y mantenimiento, todos estos componentes representan una alternativa confiable para calendarización de riego en los cultivos agrícolas ya sea en campo abierto o bajo condiciones de invernadero.

Hargreaves y Samani (H-S) (2003, Lujano *et al.*, 2023) propusieron un modelo para estimar la evapotranspiración potencial diaria (mm día^{-1}) basada en datos de temperaturas y radiación solar, que a su vez está condicionada por la localización del sitio. La radiación solar incidente se estima a partir de la radiación solar extraterrestre esto se refiere a la energía que llega a la zona exterior de la atmósfera, en otras palabras, a la radiación que llegaría al suelo si no existiera atmósfera y en función de la latitud y mes del año que se requiera estudiar (Allen *et al.*, 1998).

El método de H-S utiliza la temperatura media y la amplitud estacional a partir de datos de temperaturas máximas y mínimas, además, de datos geográficos, como la latitud de las *Estaciones Meteorológicas* o del sitio de estudio, para la estimación de la radiación extraterrestre (Hargreaves y Samani, 1985). Para valores de la radiación, también pueden utilizar mapas de radiación solar incidente (Campos-Aranda, 2005). En general, la ecuación de Hargreaves tiende a sobrestimar ET_o con respecto a la ecuación Penman-Monteith cuando el valor medio diario de la evapotranspiración es bajo y viceversa. Además, cuando la advección de calor sensible es severa, la ecuación subestima hasta un 25% para periodos diarios (Berengena y Gavilán, 2005). Por otro lado, la ecuación de Hargreaves está recomendada para cálculos semanales o incluso periodos más largos, aunque es posible encontrar estimaciones diarias de ET_o bastante precisas (Hargreaves y Allen, 2002).

Otra alternativa para abarcar superficies tales como los denominados Distritos o Módulos de riego bajo el esquema administrativo en México, es usando percepción remota. Se han desarrollado metodologías que permiten estimar de manera remota variables climáticas de interés agrícola a partir de imágenes en general y de satélite en particular, por ejemplo, usando imágenes Landsat. En la actualidad Google Earth Engine contiene una recopilación de imágenes Landsat desde 1984, además cuenta con una base de datos meteorológicos que derivó en el desarrollo de una aplicación práctica que represente la evapotranspiración en dichas imágenes. La información se encuentra disponible mediante una herramienta llamada Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEflux), basada en el modelo METRIC (Mapeo evapotranspiración a Alta Resolución con Calibración Interna).

Para la agricultura actual la herramienta de percepción remota se ha vuelto indispensable, para analizar paisajes físicos y conocer detalles como los métodos de balance de energía para calcular la evapotranspiración, la modernización por sensores remotos como SEBAL (Bastiaanssen, 2000) y el uso de METRIC (Allen *et al.*, 2007b). Como herramientas de predicción y cálculo de variables de interés que han sido aceptados siendo METRIC-EEFLUX el más utilizado ya que automatiza el cálculo a diferencia de SEBAL (Vázquez, 2019). Zenteno *et al.* (2017) realizaron un trabajo de investigación en la predicción de rendimiento de cultivo de la caña de azúcar mediante imágenes Landsat 7 que permitieron obtener

los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) e índice de estrés de humedad (MSI) y a su vez la evapotranspiración del cultivo (ET_c), calculando la variable de coeficiente de cultivo (K_c) en función de índices NDVI y utilizando la evapotranspiración de referencia (ET_o). De esta forma se obtuvo un rendimiento promedio para la zona de estudio de 114.3 t ha^{-1} .

Niza *et al.* (2021), proponen técnicas para generar un balance hídrico diario y mensual a partir del algoritmo SEBAL para poder calcular los requerimientos hídrico de los cultivos; ya que solo la cubierta vegetales abastecida por las precipitaciones de manera natural en temporales, pero en verano los cultivos suelen ser más exigentes. Esta metodología permite tener un modelo para dar un pronóstico de necesidad de recurso hídrico.

Los métodos o modelos propuestos mediante percepción remota deben ser complementarios no alternativos, resaltando que la percepción remota supera por mucho la cantidad de información por la capacidad espacial y de tiempo para tomar los datos (Sánchez, 2001). Una de las ventajas de la percepción remota es poder obtener la información de algún punto de interés, no siendo necesario encontrarse en el sitio, adicional a eso el método brinda información importante como NDVI, albedo, cubierta terrestre entre otras de grandes extensiones de superficie. Teniendo como desventaja que el servidor puede presentar errores al descargar la información.

METRIC es un modelo de balance energético de superficie que proporciona los mapas de radiación neta (R_n), flujo de calor del suelo (G), calor sensible (H), calor latente (LE), evapotranspiración (ET) y coeficiente de cultivo (K_c). Este sistema utiliza datos meteorológicos con un intervalo de tiempo a cada hora del sistema de asimilación de datos terrestres de América del Norte (NLDAS). Para desarrollar una calibración del balance de energía y el tiempo de ET en las imágenes Landsat y generar el dato de ET_o utilizando radiación solar, velocidad del viento, humedad y temperatura del aire a través de la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2012). Niza *et al.* (2021) reportaron que al comparar los modelos de balance de energía de fuente única (SEBS, QWater Model y METRIC-EEFlux) para estimar la evapotranspiración de referencia en los cultivos de hinojo-maíz y raigrás-trebol encontró resultados similares y congruentes entre SEBS y METRIC EEFlux comparado con el modelo QWater Model que mostró una congruencia más débil.

Salgado y Mateos (2009) realizaron una comparación de CROPWAT y el EEFlux en cultivo de algodón y maíz y encontraron que el modelo CROPWAT en grandes superficies puede tener una desviación de resultados y el modelo EEFlux es de manera puntual de la fecha en que pasa el satélite. El objetivo de este trabajo fue estimar la evapotranspiración real del cultivo de maíz, usando la herramienta METRIC Effluent de manera remota y comparar los resultados con el modelo Hargreaves-Samani en la zona de Hidalgo México regada con aguas tratadas.

Materiales y Métodos

Descripción de la zona de estudio

El distrito de riego 003 Tula tiene registro de más de 100 años que ha sido usado para la actividad agrícola con aguas residuales, actualmente cuenta con aproximadamente 50,000 ha para los cultivos agrícolas, siendo maíz y alfalfa los principales cultivos (Cornejo *et al.*, 2012). El Distrito de Riego 100 Alfajayucan tiene una superficie de 26,016 ha, conformado por tres Unidades de Riego, Chilcuautla, Alfajayucan e Ixmiquilpan, localizados en los municipios de Tula, Tezontepec, Mixquiahuala, Tepetitlan, Alfajayucan, Chilcuautla, Ixmiquilpan, Tasquillo (CONAGUA 2016). Las fuentes de abastecimiento de agua en el DR 100 son aguas superficiales que escurren en las presas de almacenamiento Endho, Lic. Javier Rojo Gómez, Lic. Vicente Aguirre, y las presas de derivación, Chilcuautla, Felipe Ángeles, el Maye, El Tecolote, Pallares, Xotho.

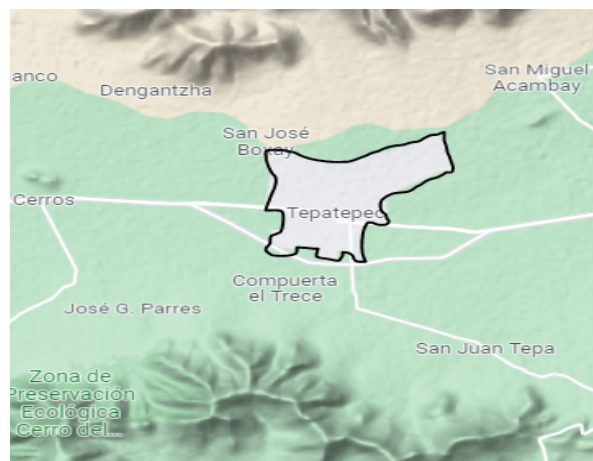


Figura 1 Localización geográfica del área de estudio, Hidalgo México

Los principales cultivos que se siembra en el ciclo agrícola otoño- invierno son; avena, cebada, coliflor, haba, trigo, otros cultivos y para el ciclo Primavera-Verano, calabacita, chile, frijol, coliflor, maíz, jitomate, tomate, y cultivos perennes alfalfa, frutales y otros pastos (Martinez-Luna *et al.*, 2021).

Los cultivos que destacan en el distrito de Ajacuba son alfalfa, maíz grano, coliflor y avena forrajera, con una superficie de 26,481 ha y en menor medida se cultivan chile seco, tomate verde, calabacita y chile verde. Este distrito se destaca por la producción de maíz grano, alfalfa y avena forrajera con una superficie sembrada de 5,931 ha (García y Edith, 2019).

Modelo Hargreaves-Samani (H-S) para estimar evapotranspiración

El modelo utilizado para estimar la evapotranspiración potencial fue la de Hargreaves-Samani y se describe en la Ecuación (1).

Para este modelo se usaron bases de datos históricos de 60 años (1956-2016) de variables de Temperatura máxima (T_{max}), Temperatura mínima (T_{min}) y temperatura media. Los datos históricos fueron obtenidos de la estación meteorológica Actopan ubicada en las siguientes coordenadas geográficas de 20.271944° Latitud, -98.941667° Longitud y 1955 m. Esta información se encuentra almacenada en la plataforma del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) mediante CLImate COMputing project (CLICOM).

Los valores de la evapotranspiración potencial diaria se calcularon a nivel diario con la Ecuación (1)

$$ET_0 = 0.00023(t_{med} + 17.78)R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (1)$$

Donde: ET₀: Es la evapotranspiración potencial diaria (mm día⁻¹); T_{med}: temperatura media diaria (°C); T_{max}: temperatura diaria máxima (°C); T_{min}: temperatura diaria mínima (°C); R₀: es la radiación solar extraterrestre en (mm día⁻¹) la cual puede ser estimada en función de la latitud, en este caso se tomó 22° latitud Norte.

Hargreaves propone otra fórmula para estimar la evapotranspiración potencial con la (Ecuación 2) la cual utiliza radiación solar incidente convertida a mm día⁻¹

$$ET_0 = 0.0135(t_{med} + 17.78)R_s \quad (2)$$

Donde: ET₀: Es la evapotranspiración potencial diaria (mm día⁻¹); T_{med}: Es la temperatura media (°C); R_s: Es la radiación solar incidente, convertida a (mm día⁻¹).

La radiación solar incidente se estima a partir de la radiación solar extraterrestre esto se refiere a la energía que llega a la zona exterior de la atmosfera, en otras palabras, a la radiación que llegaría al suelo si no existiera atmosfera, también en función de la latitud y mes del año (Allen *et al.*, 1998). Para el cálculo esta variable Samani (2000) propuso la (Ecuación 3).

$$R_s = R_0 * KT * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (3)$$

Donde: R_s: Es la radiación solar incidente (mm d⁻¹); R₀: Es la radiación solar extraterrestre (mm d⁻¹); KT: Es el coeficiente empírico en función de la presión atmosférica, adimensional; t_{max}: Es la temperatura diaria máxima (C°); t_{min}: Es la temperatura diaria mínima (C°).

Para conocer el KT, Hargreaves y Samani (1985) recomiendan un valor constante de 0,162 para zonas interiores y 0,19 para las costas. Finalmente simplificando la Ecuación 3 con la 2 se obtuvo la Ecuación (4) considerando 0,17 valor de KT.

$$ET_0 = 0,00023(t_{med} + 17,78)R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (4)$$

Donde: ET_0 : Es la evapotranspiración potencial diaria, (mm día^{-1}); T_{med} : Es temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$); R_0 : Es la radiación solar extraterrestre en, mm día^{-1} (tablas); T_{max} : Es la temperatura diaria máxima ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} : Es la temperatura diaria mínima ($^{\circ}\text{C}$).

El método de *H-S* utiliza la temperatura media y la amplitud estacional a partir de datos de temperaturas máximas y mínimas (además de datos geográficos, como la latitud de las *Estaciones Meteorológicas* o del sitio de estudio, para la estimación de la radiación extraterrestre (Hargreaves & Samani, 1985). Además, la radiación se puede obtener a partir de mapas de radiación solar incidente (Campos-Aranda, 2005). La ecuación de Hargreaves tiende a sobrestimar ET_0 con respecto a la ecuación Penman-Monteith cuando el valor medio diario de la evapotranspiración es bajo y viceversa. Berengena y Gavilán (2005) mencionan que cuando la advección de calor sensible es severa, la ecuación subestima hasta un 25% de ET_0 para periodos diarios. Por otro lado, la ecuación de Hargreaves está recomendada para cálculos semanales o incluso periodos más largos, aunque es posible encontrar estimaciones diarias de ET_0 bastante precisas (Hargreaves y Allen, 2002).

Para estimar la evapotranspiración real (ET_r), se utilizó la ecuación (5).

$$ET_r = ET_0 * K_c \quad (5)$$

Donde: ET_r : Es la evapotranspiración real del cultivo (mm día^{-1}); ET_0 : Es la evapotranspiración potencial (mm día^{-1}); K_c : Es el Coeficiente de cultivo

El K_c se obtuvo de los cálculos ya registrados por (Palacios, 1997) por día juliano para el cultivo de maíz y alfalfa, tomando en cuenta que en México se realizan dos siembras en el año Otoño-invierno y Primavera-Verano una iniciando en abril y otra en octubre terminando en septiembre y marzo respectivamente.

Descarga de imágenes LANDSAT para estimar evapotranspiración mediante METRIC.

Las imágenes fueron obtenidas en formato geo-TIFF de tamaño aproximadamente de 200 Mb. Con una resolución espacial de 30 m corregidas geográficamente con el sistema de coordenadas WGS84 y la proyección transversal de mercator (UTM zona 14 Norte), para una sola fecha Landsat una por mes, de enero a diciembre del año 2019, con la menor nubosidad posible por medio del programa EEFLUX (Earth Engine Evapotranspiration Flux) esta es una versión de METRIC (Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration) en la página de internet <https://eeflux-level1.appspot.com>, eligiendo la zona de estudio, posteriormente en el lado izquierdo de la pantalla se visualiza un marcador donde se puede especificar la fechas de inicio y termino y finalmente se elige la opción de buscar imagen (Figura 2).

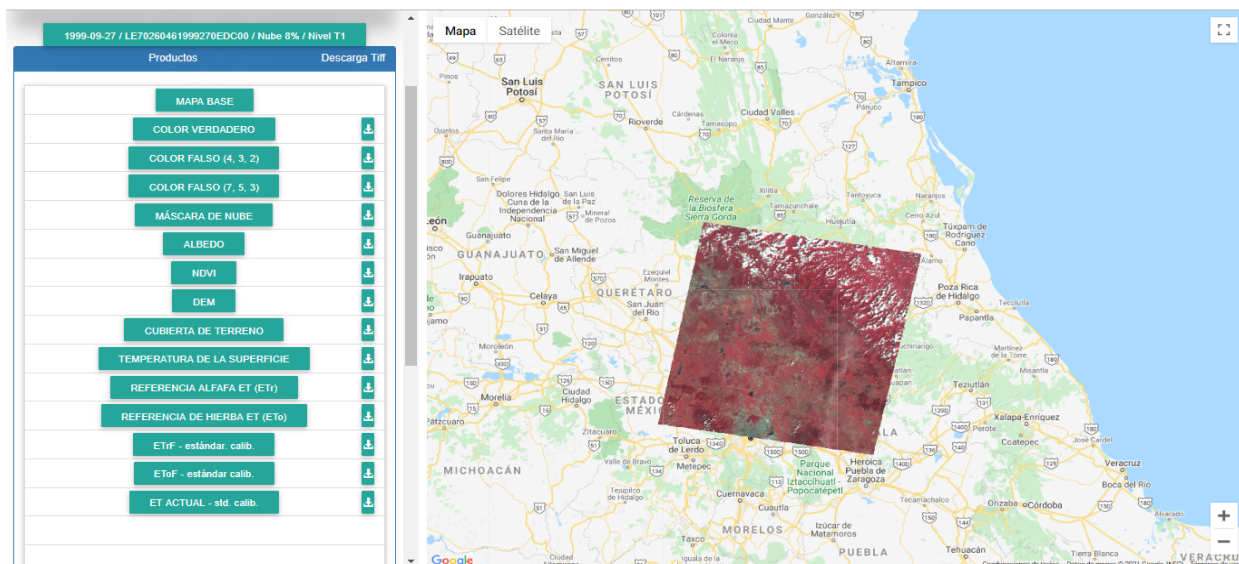


Figura 2. selección de imágenes Landsat de la zona de estudio

La herramienta ofrece un listado de todas las imágenes registradas de la zona del satélite, además, indica la fecha de la imagen y el porcentaje de nubosidad (Figura 3). Para este trabajo de investigación se utilizó el software QGIS 3.10 para el procesado de las imágenes y con ello se obtuvo el mosaico de los rasgos de interés en la zona de agrícola (Figura 3).

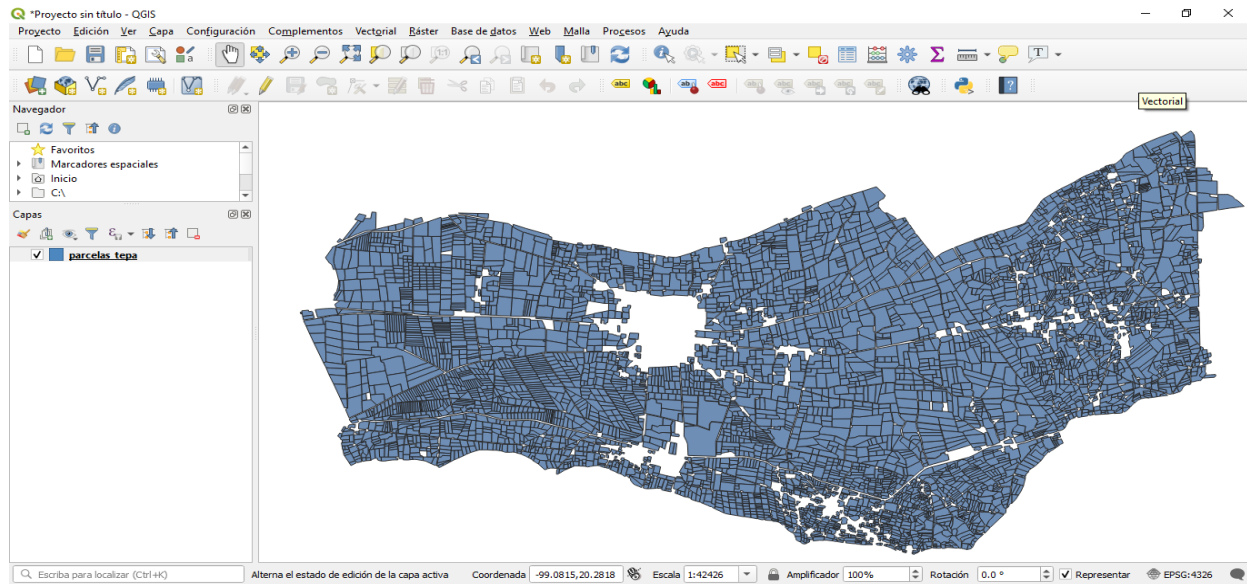


Figura 3. Capa en QGIS de la delimitación de las parcelas de Tepantepec.

Estimación de la evapotranspiración mediante el método METRIC.

La aplicación despliega las bandas térmicas y de onda corta de Landsat para derivar ET (ET real del albedo, la vegetación y otros parámetros de la superficie). Las Imágenes METRIC-EEFlux se calibran internamente a partir de la ET de referencia de alfalfa (ET_o) utilizando datos meteorológicos cuadrículados para recuperar la fracción de ET_o ($ET_o F$). Esta fracción se utilizó para extrapolar instantáneas ET (ET_{ins}) de acuerdo con las ecuaciones dadas (Niza *et al.*, 2021). El primer término, ET_{ins} pertenece a ET en cada píxel en el momento del paso elevado del satélite, derivado del flujo de calor latente (ecuación 6).

$$ET_{ins} = 3600 * \frac{LE}{\lambda * \rho_w} \quad (6)$$

Donde: ET_{ins} : Es la evapotranspiración instantánea (mm h^{-1}); λ : Es el calor latente de vaporización (J kg^{-1}); ρ_w : es la densidad del agua (kg m^{-3}).

La fracción de ET de referencia se calcula como (ecuación 7).

$$ET_o F = \frac{ET_{ins}}{ET_o} \quad (6)$$

Donde: $ET_o F$: Es la fracción de evapotranspiración de referencia; ET_{ins} : Es la evapotranspiración instantánea (mmh^{-1}); ET_o : Es la evapotranspiración de referencia

Al final la ET_a en cada píxel se deriva como ecuación 8.

$$ET_a = ET_o F * ET_o \quad (6)$$

Donde: $ET_o F$: Es la fracción de evapotranspiración de referencia (mm dia^{-1}); ET_o : Es la evapotranspiración de referencia (mm dia^{-1}).

El principio de EEFlux es congruente con el método tradicional de la FAO para ET real (referencia $ET_o \times K_c$), donde ET_o es similar al coeficiente de cultivo (K_c). En este método, los píxeles calientes y fríos estimados a partir de ET_o se utilizan en el modelado sensible flujo de calor (H).

Este modelo obtiene la ET_r mediante un balance de energía derivada de las imágenes de banda térmica provenientes de los satélites Landsat 7 los valores se obtienen mediante una calibración interna en el cálculo de calor sensible H , basada en la relación lineal entre la temperatura radiométrica y la temperatura del aire, se hace la selección de dos píxeles caliente y frío. El píxel cálido corresponde a un suelo desnudo que presenta una alta temperatura y un NDVI típico de este tipo de cubiertas en el que se considera que existe poca o ninguna ET_r de la imagen en zonas no desérticas. El píxel frío, es el extremo opuesto al anterior y marca el techo evapotranspirativo en la imagen, que corresponde a un cultivo de regadío preferiblemente alfalfa o maíz en óptimas condiciones y densa cubierta vegetal presentando, por tanto, un elevado NDVI y una baja temperatura (González *et al.*, 2015). Las imágenes obtenidas están sujetos al paso del satélite en este caso la plataforma (EEFlux) obtiene 2 imágenes, al mes variando el grado de nubosidad.

La observación de los píxeles fríos y calientes se obtiene con el programa QGIS, generando una modificación de las propiedades de la capa: Se coloca ambas capas en el programa QGIS para poder realizar un recorte de la imagen, que corresponderá solo a la zona de estudio (Figura 4) esto puede ser opcional ya que se puede hacer solo con la imagen descargada. Primero se ingresa al menú de “vectorial” y después a la opción “herramientas de geoprocso”.

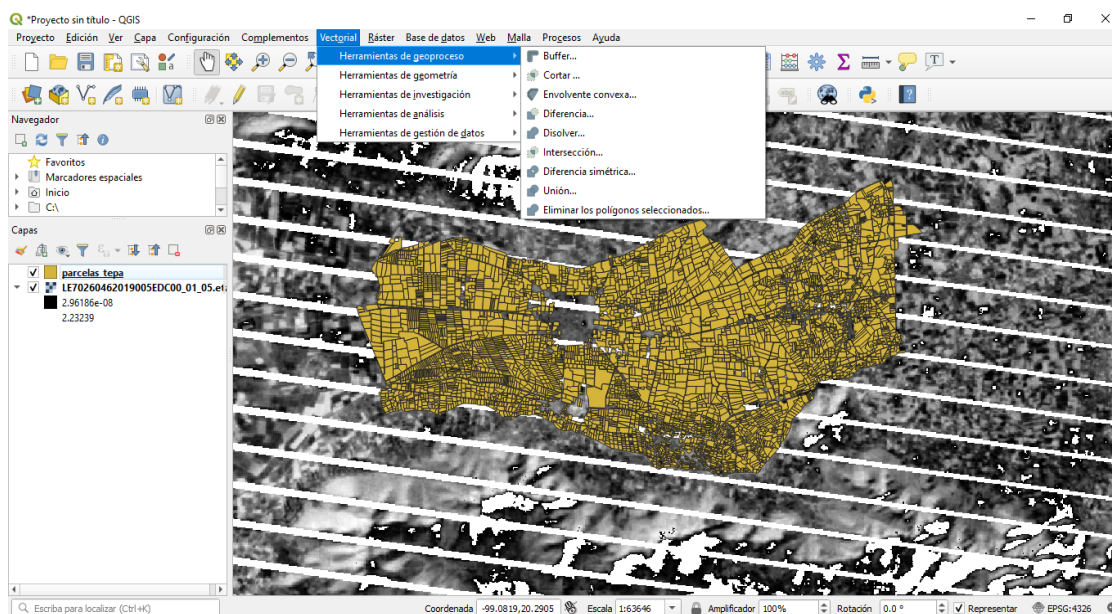


Figura 4. QGIS, herramienta vectorial.

Resultados y Discusión

Se usaron dos metodologías para estimar evapotranspiración real de los cultivos; la primera utiliza base de datos meteorológicos y la segunda imagen de satélites. Los resultados indican que ambas metodologías son concordantes y proporcionan una herramienta para la estimación del consumo del agua.

La metodología METRIC EEFlux con ayuda del programa QGIS se puede estimar la evapotranspiración de cultivo de manera muy sencilla, ya que estos programas son de fácil acceso y de uso muy práctico.

Estimación de valores mensuales de la evapotranspiración de cultivo

Se obtuvieron valores promedios de ET_r mensual de todos los píxeles que corresponden a las parcelas regadas en Tepantepec con aguas residuales por medio de la imagen descargada correspondiente a cada mes (Tabla 1). Se observa que en el mes de julio se presentó el valor más alto de 4.28 mm día^{-1} que coincide con mes más caluroso de la zona y

valores más bajos fueron de 0.92 y 0.51 mm día⁻¹ y se presentaron en los meses de enero y diciembre que coincide con la temporada de frío en la zona de estudio (Tabla 1). Castañeda-Ibáñez *et al.* (2018) con misma metodología de Metric obtuvieron valores de evapotranspiración de 1.0 mm día⁻¹ en el mes de enero y 6.0 mm día⁻¹ en el mes de abril en el Distrito de Riego Rio Yaqui.

Tabla 1. Datos de *ETr* promedio mensual mediante el método Metric EEFlux

Mes	<i>ETr</i> mm día ⁻¹
Enero	0.92
Febrero	1.58
Marzo	1.99
Abril	1.84
Mayo	2.02
Junio	2.30
Julio	4.28
Agosto	3.38
Septiembre	2.33
Octubre	0.85
Noviembre	1.12
Diciembre	0.51

En la Figura 5 se presenta la variación temporal de la evapotranspiración real en los distritos de riego donde es posible observar que en el mes de julio se presentó el valor más alto de la evapotranspiración real y esto coincide con la temporada de lluvia en la zona de estudio. En esta región cuenta con la ventaja de recibir aguas tratadas del valle de México. Esta estimación proporciona información útil en la planeación de las fechas de siembra, tipos de cultivo y en la programación y aplicación más eficiente y oportuna de riegos en los cultivos agrícolas de la zona de estudio.

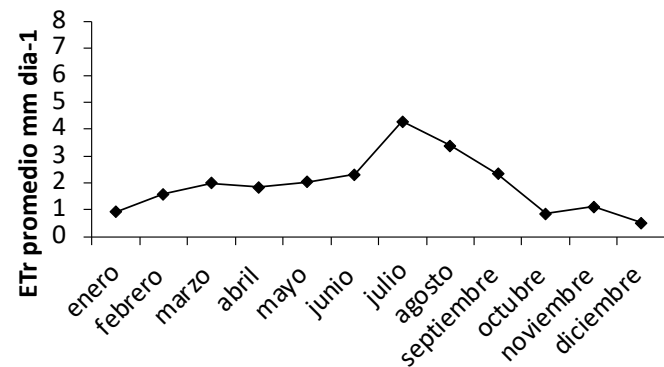


Figura 5. Estimación de la *ETr* promedio mensual por el método de METRIC EEFlux.

Estimación de *ETr* mensual con el método de Hargreaves-Samani

Cuando la evapotranspiración es estimada con datos históricos por el método de Hargreaves-Samani, estos valores presentan un comportamiento estable durante todo el año lo cual tiene sentido, ya que las imágenes de satélite son datos estacionarios (Figura 6).

Otra de las ventajas de estas metodologías es que conociendo la firma espectral de los cultivos es factible llevar a cabo un monitoreo sobre el consumo de agua en los cultivos, lo cual reduce los riesgos de pérdidas de agua de riego y brinda la posibilidad de calendarizar láminas de riego por tipo de cultivo. En la tabla 2 se presentan los

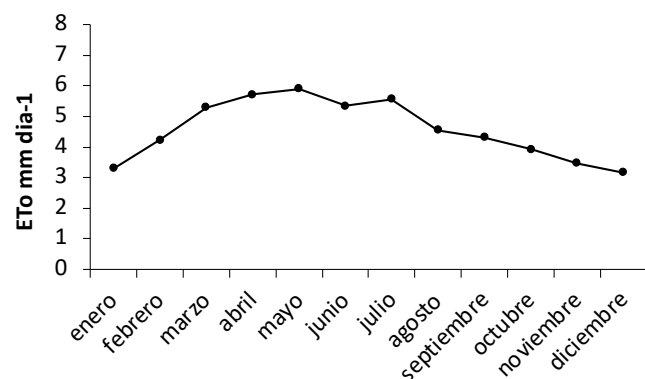


Figura 6. Estimación de la *ETo* promedio mensual obtenida por método de Hargreaves-Samani.

valores de evapotranspiración de referencia, coeficiente de cultivo y la evapotranspiración real para el cultivo del maíz. Con estos valores se puede hacer una mejor planeación en la programación de riego en el cultivo de maíz ya que es el cultivo más importante representativo en todo el país. Se observa que en el mes de febrero y agosto se presentan los valores más altos de coeficiente de cultivo en consecuencia los cultivos que siembran en estos meses requieren mayor volumen de agua para satisfacer sus necesidades hídricas (Figura 7). Reyes *et al.* (2019) reportaron valores similares de Kc en el cultivo de maíz forrajero calculadas in situ con NDVI y estimada con sensores remotos.

Los mismos autores mencionan que las curvas de coeficiente de cultivo (kc) ajustado como una función del índice de vegetación de diferencias normalizada (NDVI) obtenidas in situ y estimados con sensores remotos mostraron una misma tendencia con valores de 0.2 a 1.0.

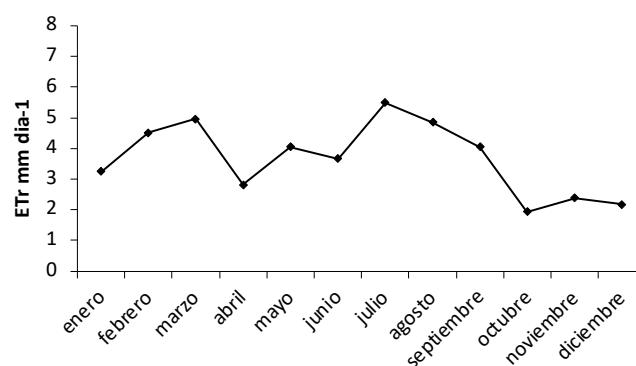


Figura 7. Estimación de la ETr promedio mensual de maíz obtenida por método de Hargreaves-Samani

Tabla 2. Datos de ETo y Kc mensual de maíz para obtener ETr promedio mensual

Mes	ETo mm día ⁻¹	Kc	ETr mm día ⁻¹
Enero	3.30	0.98	3.25
Febrero	4.22	1.06	4.50
Marzo	5.29	0.93	4.96
Abril	5.71	0.49	2.81
Mayo	5.9	0.68	4.05
Junio	5.34	0.68	3.66
Julio	5.57	0.98	5.48
Agosto	4.55	1.06	4.85
Septiembre	4.31	0.93	4.04
Octubre	3.92	0.49	1.93
Noviembre	3.46	0.68	2.37
Diciembre	3.16	0.68	2.17

Comparación del método de METRIC y el de Hargreaves-Samani

Finalmente, en la Figura 8 se presenta la comparación de los valores de evapotranspiración real entre el método de Metric con los valores de Hargreaves-Samani. Por el método de Metri utiliza imágenes de satélite lo que implica que son datos puntuales en el momento que la imagen fue tomada y por el método Hargreaves-Samani utilizan bases de datos normales, se consideran un promedio de más de 24 años por lo que en este tipo de cálculo los valores se consideran más estables que los puntuales.

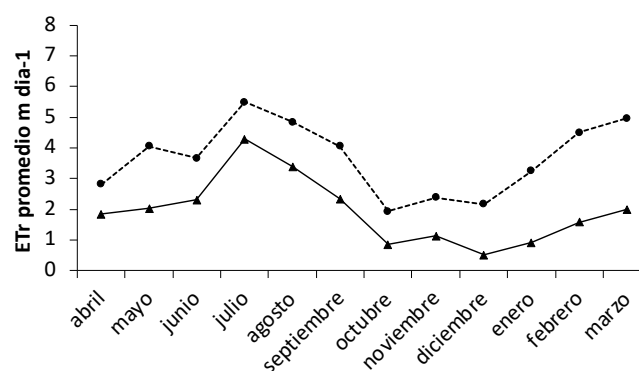


Figura 8. Comparación de la ETr por método Metric y Hargreaves – Samani.

Príncipe (2018) menciona que la técnica de Eddy Covariance (EC) es uno de los métodos más exactos de medición de la ET, sin embargo, presenta la desventaja de medir de manera puntual. Frente a esto el modelo Metric resulta ser un método eficaz para la medición de la ET a nivel espacial, proporcionando valores cercanos a los observados mediante la técnica de EC, siendo esta una alternativa viable de estimación de ET para grandes extensiones de terreno.

Coeficiente de correlación

Se puede apreciar una regresión lineal entre ambos métodos de estimación de la evapotranspiración de cultivo. La dispersión de los puntos tiene un patrón definido. El análisis de regresión lineal es positivo, lo que indica que las variables son dependientes y se pueden explicar mutuamente con una confianza del 67% (Figura 9). Castañeda-Ibáñez *et al.* (2018) obtuvieron una regresión lineal de 82% al correlacionar la *ETo* del Eddy Covariance y en la estimación de *ETo* con el método de Metric.

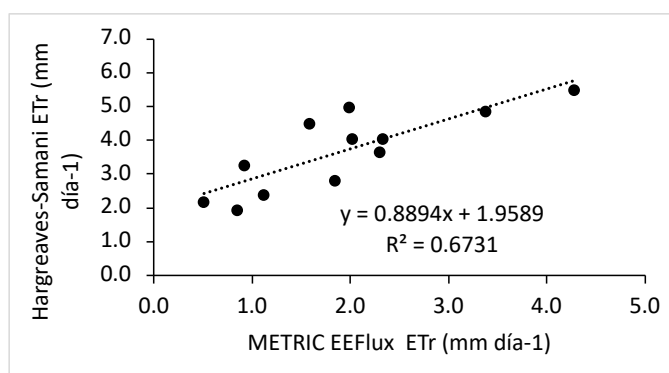


Figura 9. Coeficiente de regresión lineal de *ETo* entre ambos métodos.

Además, Mendoza-Perez *et al.* (2019) obtuvieron una regresión lineal de 87% al correlacionar la *ETo* del atmómetro y *ETo* de la estación meteorológica automatizada. French *et al.* (2015) menciona que comparado con otros métodos que utilizan información de imágenes satelitales, Metric tiene mayor confiabilidad cuando los datos terrestres son escasos.

Otros estudios, reportan que METRIC puede mejorar la estimación de la *ET*, si el proceso de ejecución se hace diferenciando la temperatura del dosel, del suelo sombreado y del suelo a libre iluminación solar (Pôças *et al.*, 2014). Con respecto a la estimación de la eficiencia en el uso del agua, la estimación puede mejorar si se conoce el gasto aplicado a mayor resolución espacial y temporal para detectar las áreas con menor eficiencia en el uso del agua en el distrito de riego. Por lo que los resultados adolecen de la validación que permita contribuir a mejorar el uso y manejo del agua al proponer acciones para incrementar la eficiencia.

Conclusiones

Las nuevas tecnologías de percepción remota permiten obtener resultados puntuales y periódicos que se puedan tomar como referencia en el manejo de agua y dosificación para la parcela. Además, se demostró que el uso de las imágenes de satélite para la estimación de ET es una solución a las limitaciones que presenta los métodos de medida puntual. La metodología Hargreaves–Samani ajustada permitió obtener resultados satisfactorios, siendo su principal ventaja la de requerir sólo de datos de temperatura máxima y mínima del aire, información disponible en gran cantidad de estaciones meteorológicas del país. La zona de cultivo donde se realizó el presente estudio muestra una alta demanda de agua en los meses de marzo y julio. Contar con datos de ET precisos es un apoyo para mantener un control de agua en los canales de riego.

Bibliografía

- Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *FAO irrigation and drainage paper* 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents> Versión en español: <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R. & Bastiaanssen, W.G.M. (2002). SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land): Advanced Training and User's Manual. Version 1.0. Idaho Department of Water Resources. Idaho, USA. Pp. 98. <https://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>
- Allen, R.G, Morton, C., Kamble, B., Kilic, A., Huntington J., Thau D., Gorelick N., Erickson T., Moore R., Trezza R., Ratcliffe I., & Robison C. (2002). EEFlux: A Landsat-based Evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. *ASABE / IA Irrigation Symposium*, 10–12. <https://doi.org/10.13031/irrig.20152143511>
- Allen, R.G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007b). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))

- Allen, R. G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2012). Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO—Food and Agriculture Organization of the United Nations, 297 p., 1998. Crescentes de irrigação com água salina. *ACSA—Agropecuária Científica no Semiárido*, 8(4), 60–65. <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- Bastiaanssen, W.G.M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229, 87–100. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4)
- Berengena, J., & Gavilán, P. (2005). Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(2), 147–163. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:2\(147\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:2(147))
- Castañeda-Ibáñez, C.R., Flores-Magdaleno, H., Martínez-Menes, M., Esparza-Govea, S., Fernández-Reynoso, D., Prado-Hernández, V., & Pascual-Ramírez, F. (2018). Estimación de la evapotranspiración mediante un balance de energía utilizando sensores remotos. *Ecosist. Recur. Agropec*, 5(15), 537–545. <https://doi.org/10.19136/era.a5n15.1647>
- Campos-Aranda, D. F. (2005). Estimación empírica de la ETP en la República Mexicana. *Ingeniería hidráulica en México*, 20(3), 99–110. <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1031>
- Cornejo, O. F., López, H. M., Beltrán, H. R., Acevedo S. O., Lucho, C. C., & Reyes S. M. (2012). Degradación del suelo en el Distrito de riego 003 Tula, Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(4), 873–880. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10202203>
- French, A.N., Hunsaker, D.J., & Thorp, K.R. (2015). Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. *Remote Sensing of Environment*, 158, 281–294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.003>
- Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hargreaves, G.H., & Allen, R.G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53–63. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53))
- Henríquez-Dole, L., & Miner-Vega, A. J. (2014). Revisión y validación de la evapotranspiración potencial (ETP) media anual y media mensual en Honduras obtenida por métodos ambientales de percepción remota. *Revista Ciencia y Tecnología*, 14(6), 77–98. <https://doi.org/10.5377/rct.v0i14.1797>
- García, S., & Edith, M. (2019). El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 29(54), 2–34. <https://doi.org/10.24836/es.v29i54.741>
- Knox, J., Rodríguez-Díaz, J., & Hess, T. (2011). Estimating Evapotranspiration by Using Atmometers for Irrigation Scheduling in a Humid Environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(11), 685–691. DOI:10.1061/(ASCE)IR.1943
- Martínez-Luna, D., Mora-Flores, J.S., Exebio-García, A. A., Arana Coronado, O.A., & Arjona-Suárez, E. (2021). Valor económico del agua en el Distrito de Riego 100, Alfajayucan, Hidalgo. *Terra Latinoamericana*, 39, 1–12. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.544>
- Mendoza, P. C., Ojeda, B.W., Sifuentes, I.E., Quevedo, N.A., Flores, M. H., Ramírez, A.C., & Ascencio, H.R. (2019). Estimación de la evapotranspiración de referencia por atmómetros con fines de calendarización de riego. *Rev. Agric. Zon. Árid. Semiár.*, 37(4), 65–72. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019000400065>
- Mckenney, M. S., & Rosenberg, N. J. (1993). Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64, 81–110. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(93\)90095-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(93)90095-Y)
- Montaner, S. M., & Sánchez, S. E. (1988). Aproximación, por el método de Thornthwaite, al cálculo de infiltración de lluvia útil. *Papeles de Geografía*, 14, 223–225. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/42801/41121>
- Niza, Z., Khan, M.S., Govind, A., Marchetti, M., Lasserre, B., Magliulo, E., & Manco, A. (2021). Evaluation of SEBS, METRIC-EEFlux, and QWaterModel Actual Evapotranspiration for a Mediterranean Cropping System in Southern Italy. *Agronomy*, 11, 345. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020345>
- Ortiz, C. R., & Chile, A. M. (2020). Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Siembra*, 7(1), 1–14. <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i1.1450>
- Palacios, V.E. (1997). Benefits and Second-Generation Problems of Irrigation Management Transfer in México.
- Pôças, I., Paço, T.A., Cunha, M., Andrade, J.A., Silvestre, J., & Sousa, A. (2014). Satellite-based evapotranspiration of a super-intensive olive orchard: Application of METRIC algorithms. *Biosystems Engineering*, 128, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.019>
- Reyes, G.A., Reta, S.D.G., Sánchez, D.J.I., Ochoa, M.E., Rodríguez, H.K., & Preciado, R.P. (2019). Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones in situ. *Terra Latinoamericana*, 37(3), 279–290. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.485>
- Salgado, R.P., & Mateos, L. (2019). Evaluación de métodos para el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos con vistas a la evaluación del desempeño de distritos de riego. *Asociación Española de Riegos y Drenajes y Universidad de Extremadura*. 10.17398/AERYD.2019.A26. <https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/9245/1/A-26.pdf>
- Squeo, F. A., & León, M.F. (2007). Transpiración. En Squeo F.A. y L. Cardemil (Eds.), *Fisiología vegetal*. Ediciones Universidad de La Serena, Chile. <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Transpiracion.pdf>
- Sánchez, M. (2001). Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 28, 3–10. <https://revistanortegrande.uc.cl/index.php/RGNG/article/view/46563>
- Samani, Z. (2001). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), 265–267. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:4\(265\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(265))
- Vázquez, B. R. (2019). Estimación de la evapotranspiración de cultivo de maíz bajo riego mediante percepción remota. *Tesis de Maestría*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México. 114p. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2065>
- Villa-Nova, N. A., Pereira, A.B., & Shock, C.C. (2007). Estimation of reference evapotranspiration by an energy balance approach. *Biosystems Engineering*, 96(4), 605–615. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.12.005>
- Villaseñor Sánchez, E. I., & Soto Sánchez, A. P. (2024). Desafíos y oportunidades en la gobernanza de áreas verdes urbanas: el caso del Parque Ecológico El Crestón en Oaxaca, México. *Sociedad y Ambiente*, 2024(27), 1–29. <https://doi.org/10.31840/sya.v2024i27.2905>
- Zenteno, C.G.A., Palacios, V.E., Tijerina, C. L., & Magdaleno, F.H. (2017). Aplicación de tecnologías de percepción remota para la estimación del rendimiento en caña de azúcar. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(7), 1575–1586. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.513>