



## DETERMINACIÓN DEL REQUERIMIENTO DE AGUA DE UN CULTIVO DE MAÍZ MEDIANTE UN BALANCE DE ENERGÍA IMPLEMENTADO EN LA PLATAFORMA GOOGLE EARTH ENGINE

Víctor Manuel Gordillo Salinas<sup>1\*</sup>; Mario Alberto Montiel Gutiérrez<sup>1</sup>; Juan Arista Cortes<sup>1</sup>, Jorge Andrés Castillo González<sup>1</sup>, Ernesto Olvera Aranzolo<sup>1</sup>, José Javier Ramírez Luna<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

gordillo.victor@hotmail.com –777 329 3600 ext. 864 (\*Autor de correspondencia)

### Resumen

La determinación de las necesidades de agua de los cultivos agrícolas es clave importante en el manejo sustentable del agua de riego en México. Modelos de estimación de la pérdida de agua por los cultivos en conjunto con herramientas espaciales y plataformas de procesamiento en la nube son herramientas necesarias para determinar el momento, el lugar, el tiempo y la cantidad precisa de riego para satisfacer la demanda de las plantas, provocando un ahorro del recurso hídrico. El objetivo de este estudio fue implementar los algoritmos del modelo Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration (METRIC) en la plataforma de Google Earth Engine (GEE) para aprovechar el poder de procesamiento, asimismo, comparar los resultados con las estimaciones del modelo estándar de FAO-56. El método FAO-56 se estimó con la evapotranspiración de referencia del cultivo de alfalfa (ET<sub>r</sub>). Se compararon las estimaciones de los dos modelos para la etapa media del cultivo de maíz. Tres imágenes Landsat 8 estuvieron disponibles, libres de nube, para el periodo de la etapa de interés. Los resultados mostraron una sobreestimación del modelo METRIC en comparación del modelo estándar FAO-56 (PBIAS= -18.08 %, RECM= 1.15 mm día<sup>-1</sup>, MBE= 0.74 mm día<sup>-1</sup>). El valor de la fracción de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>rF</sub> o K<sub>c</sub>) para la etapa media del maíz evaluado en este experimento presentó un valor máximo de 0.91 el cual no alcanzó el máximo reportado en la literatura (1.05).

Los resultados encontrados y los algoritmos programados en este trabajo de investigación son la base para futuras calibraciones y validaciones de la ET de diferentes cultivos.

**Palabras claves:** METRIC, GEE, Evapotranspiración



## Introducción

La cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo se define como necesidades de agua del cultivo (Allen, R, G., L.S. Pereira, D. Raes, 1998).

La escasez de agua en la zona norte de México, en especial en la zona de estudio, ha presentado una categoría de sequía extrema “D3” según la clasificación de la Intensidad de la Sequía de acuerdo con el Monitor de Sequía de América del Norte (NADM). En la categoría “D3” se señalan pérdidas mayores en cultivos y pastos, el riesgo de incendios forestales es extremo y se generalizan las restricciones en el uso del agua debido a su escasez (Conagua, 2021).

El uso eficiente del agua de riego depende de la correcta programación de riego para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos. El método más común para estimar el requerimiento de agua de los cultivos para la programación del riego es el método de dos pasos descrito en el manual de riego y drenaje de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación #56 (FAO-56) (Allen, R, G., L.S. Pereira, D. Raes, 1998). Este método determina la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) mediante el producto de un cultivo de referencia ( $ET_{ref}$ ) con un coeficiente de cultivo ( $K_c$ ).

La  $ET_{ref}$  es determinada desde parámetros climáticos que son usados para predecir la transferencia de energía desde el cultivo hacia la atmosfera. Normalmente se utilizan dos cultivos de referencia: una superficie de pasto corto de 0.12 m y una superficie de alfalfa de 0.5 m. La referencia de pasto ( $ET_o$ ) tiene un uso más común en todo el mundo para una amplia variedad de cultivos, sin embargo, el cultivo de alfalfa como referencia describe mejor la  $ET_c$  de mitad de temporada de muchos cultivos anuales (Jensen & Allen, 2016; Wright & Jensen, 1972).

El desarrollo de técnicas y tecnologías para la cuantificación del consumo de agua en la producción de alimentos es un tema imprescindible para lograr el uso sostenible del recurso hídrico. A medida que aumenta la competencia por los recursos hídricos finitos en la tierra, debido al crecimiento de la población y la riqueza, la agricultura se enfrenta a una presión cada vez mayor para mejorar la eficiencia del agua (Hsiao et al., 2007).

Los modelos para determinar las necesidades de agua de los cultivos mediante sensores remotos han sido una alternativa viable debido a su capacidad de monitoreo de parcelas bajo riego a grandes escalas, superando las desventajas del monitoreo puntual de los sensores in-situ.

Estos modelos pueden ser separados en dos grandes grupos: modelos basados en índices de vegetación (IV) y los modelos basados en la temperatura de la superficie terrestre ( $T_s$ ) (Laipelt et al., 2021)

Los modelos VI se basan en índices de verdor de la vegetación (como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) o el índice de área foliar (LAI) y datos



meteorológicos (principalmente radiación neta ( $R_n$ ), déficit de presión de vapor (DPV) y temperatura del aire ( $T_{aire}$ ) (Laipelt et al., 2021).

Los modelos de  $T_s$  han sido aplicados en distintos usos del manejo de los recursos hídricos en múltiples escalas, ya que  $T_s$  sirve como un indicador efectivo de la humedad del suelo (Anderson et al., 2011).

Entre los distintos modelos basados en la temperatura de la superficie, Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration (METRIC) (R. G. Allen et al., 2007), estima las necesidades de agua del cultivo mediante un residual de la ecuación de balance de energía en la superficie.

El modelo METRIC ha presentado un buen desempeño en la estimación del consumo del recurso hídrico en distintos cultivos a nivel global y ha sido validado con datos de campo derivados de instrumentos de medición como lisímetros, torres de Eddy covariance, atmómetros (French et al., 2015; Khan et al., 2019; Lima et al., 2020; PÔças et al., 2014; Reyes-González et al., 2017)

METRIC usa un gradiente de temperatura cercano a la superficie ( $dT$ ) para cada píxel dentro de una imagen en función de una relación de regresión entre el  $dT$  y la temperatura superficial radiométrica ( $T_s$ ) de dos píxeles de anclaje. Los píxeles de anclaje representan las condiciones de un campo agrícola con cobertura vegetal total y máxima ET de cultivo (condición fría) y un campo agrícola desnudo sin cobertura vegetal y seco donde se considera que no se utiliza energía para el calor latente ( $\lambda ET$ ) (condición cálida) (R. G. Allen et al., 2007; Reyes-González et al., 2017).

La automatización de los procesos en la estimación de la ET ha conducido al uso de herramientas y procesamiento de cómputo en la nube (R. Allen et al., 2015; Laipelt et al., 2021).

Debido a su naturaleza automatizada y su dependencia de los datos de la nube, los modelos de estimación de ET en estas plataformas tiene el potencial de evaluar el uso del agua y mejorar la gestión del riego a nivel de campos agrícolas, así como en grandes regiones a un costo extremadamente bajo (Kadam et al., 2021).

El objetivo principal de este estudio fue (1) implementar los algoritmos del modelo METRIC dentro de la interfaz de programación de la plataforma de cómputo en la nube denominado Google Earth Engine (GEE), para estimar y monitorear, de manera eficiente y semiautomizada la  $ET_c$  en un ciclo agrícola para un cultivo de maíz de una parcela experimental en la Fundación Produce Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México; (2) comparar (parear) el consumo acumulado de agua (lámina acumulada) determinada a partir del método propuesto en el manual de FAO-56 en la etapa media del cultivo, considerada a cobertura total y de mayor demanda de agua, con los estimados por el modelo de balance de energía METRIC usando imágenes de satélite Landsat 8.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en una parcela experimental de la Fundación Produce Sinaloa, ubicado en la ciudad de Culiacán, en el estado de Sinaloa (figura 1). Se estableció un cultivo de maíz con una densidad de siembra de 100,000 plantas/ha. La textura del suelo es Franco-Limoso.

El cultivo se estableció el 15 de noviembre del 2022 y la fecha de cosecha fue el día 12 de mayo del 2022 (ciclo de cultivo de 178 días).

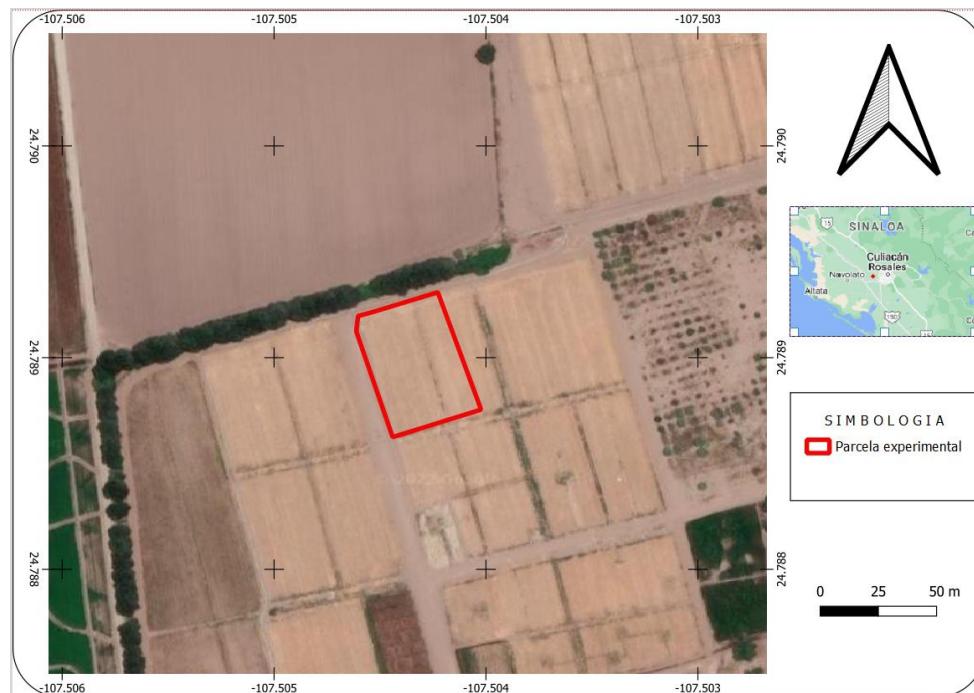


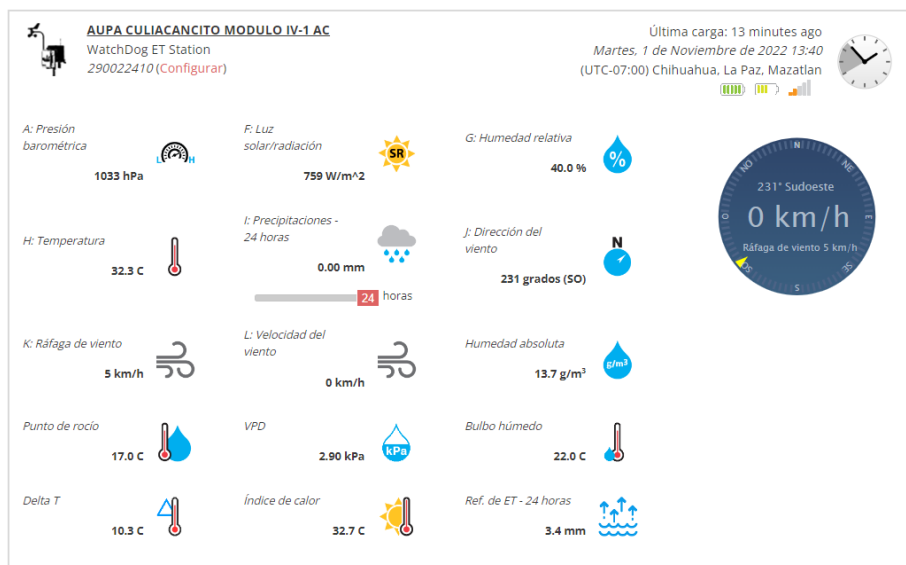
Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio. Parcela fundación Produce Sinaloa.

### Datos climáticos.

El modelo METRIC requiere de datos climáticos para la estimación de los distintos componentes del balance de energía en la superficie y también para determinar la evapotranspiración teniendo como cultivo de referencia a la alfalfa (ETr).

Los datos de las variables climáticas de interés fueron medidos en una estación meteorológica WatchDog Serie 2000 (*Spectrum Technologies, Inc, Aurora, Illinois, USA*). El equipo cuenta con sensores para medir la temperatura, la humedad, la lluvia, el viento y la radiación solar a cada periodo de tiempo, según el interés del usuario.

El acceso, consulta y descarga de la información colectada en campo fue realizada desde la página web <https://www.specconnect.net/> (figura 2).



**Figura 2.** Interfaz de consulta de las variables climáticas en tiempo real. (Página web SpecConnect).

### Estimación de la evapotranspiración de cultivo con el método de FAO-56

La determinación de la  $ET_c$  se determinó con la siguiente función:

$$ET_c = K_c \times ET_{ref} \quad (1)$$

Donde:

$ET_c$ = Evapotranspiración del cultivo (mm en un periodo de tiempo)

$K_c$ = Coeficiente de cultivo simple en condiciones estándar (adimensional)

$ET_{ref}$ = Evapotranspiración de un cultivo de referencia (Pasto o Alfalfa)

La  $ET_{ref}$  se calculó con la ecuación de ASCE Penman Monteith para un cultivo de referencia de alfalfa con una altura de 0.5 m:

$$ET = \left( \frac{\Delta(R_n - G) + K_{time} \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \right) / \lambda \quad (2)$$

Donde:

$ET$ = Evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$  o  $\text{mm h}^{-1}$ )

$R_n$ = Radiación neta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  o  $\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )

$G$  = Flujo de calor del suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  o  $\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )

$(e_s - e_a)$  = Déficit de presión de vapor del aire (kPa)

$e_s$ = Presión de vapor a saturación del aire (kPa)

$e_a$ = Presión real de vapor del aire (kPa)

$\rho_a$ = Densidad media del aire a presión constante ( $\text{kg m}^{-3}$ )



$c_p$  = Calor específico del aire ( $\text{MJ Kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$\Delta$  = pendiente de la relación entre la temperatura y la presión de vapor de saturación ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$\gamma$  = Constante psicrométrica, ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$r_s$  = Resistencia superficial total, ( $\text{s m}^{-1}$ )

$r_a$  = Resistencia aerodinámica, ( $\text{s m}^{-1}$ )

$\lambda$  = Calor latente de vaporización, ( $\text{MJ kg}^{-1}$ )

$K_{\text{time}}$  = Es una conversión de unidades, ( $86,400 \text{ s d}^{-1}$  para ET en  $\text{mm d}^{-1}$  y  $3600 \text{ s h}^{-1}$  para ET en  $\text{mm h}^{-1}$ ).

### Plataforma de cómputo en la nube Google Earth Engine (GEE)

Google Earth Engine es una plataforma basada en la nube para el análisis geoespacial a escala planetaria (figura 3) que aprovecha las capacidades informáticas masivas de Google para abordar una variedad de problemas sociales de alto impacto, como la deforestación, la sequía, los desastres, las enfermedades, la seguridad alimentaria, la gestión del agua, el control del clima y la protección del medio ambiente.

Earth Engine consta de un catálogo de datos de varios petabytes listo para el análisis que se ubica junto con un servicio de cómputo intrínsecamente paralelo de alto rendimiento. Se accede a él y se controla a través de una interfaz de programación de aplicaciones (API) accesible por Internet y un entorno de desarrollo interactivo (IDE) basado en web asociado que permite la creación rápida de prototipos y la visualización de resultados (Gorelick et al., 2017).

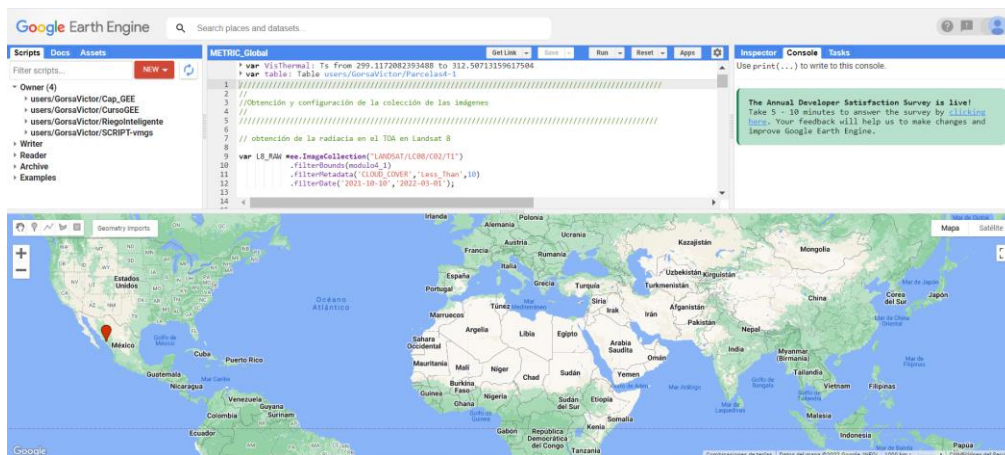


Figura 3. Interfaz de la plataforma Google Earth Engine.

Dentro del catálogo de datos de GEE se encuentran distintos conjuntos de datos geoespaciales disponibles públicamente, entre ellos, imágenes de satélite de la serie Landsat.

En el presente estudio se implementaron los algoritmos del modelo METRIC dentro de la plataforma GEE bajo el lenguaje JavaScript y se usaron imágenes Landsat 8 disponibles



en la misma plataforma, es necesario mencionar que el procesamiento y la selección de dichas imágenes son realizadas en la nube, con lo cual, se tiene la ventaja de prescindir de la descarga de gran tamaño y con la ayuda de los servidores que pone a disposición la empresa Google, los procesamientos son más eficientes en tiempo y costo.

Se filtraron las imágenes de la colección del Landsat 8 que cubrieron la estación de crecimiento del cultivo de maíz, mediante filtros de rangos de tiempo, de ubicación y de nubosidad, con la finalidad de monitorear y mapear la ET.

Las imágenes seleccionadas del catálogo de escenas del sensor Landsat 8 cumplieron con la condición de presencia de nubosidad por debajo del 10 %, buscando imágenes de buena calidad para obtener el mejor desempeño del modelo.

### **Descripción del modelo del balance de energía METRIC**

R. G. Allen et al., 2007 desarrollaron el modelo METRIC, basado en el procesamiento de imágenes de satélite para el cálculo de la evapotranspiración (ET) como un residual del balance de energía superficial. El cálculo de la ET se realizó a nivel de píxel en todas las imágenes procesados usando la siguiente función:

$$LE = R_n - G - H \quad (3)$$

Donde:

LE= Energía latente consumida por ET (W/m<sup>2</sup>)

R<sub>n</sub>= Flujo de radiación neta (W/m<sup>2</sup>).

G= Flujo de calor del suelo (W/m<sup>2</sup>)

H= Flujo de calor sensible (W/m)

La radiación neta (R<sub>n</sub>) se determinó mediante el balance de la radiación, es decir, todos los flujos radiantes entrantes menos los flujos radiantes salientes, como se presenta en la función continuación:

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_o)R_{L\downarrow} \quad (4)$$

Donde:

R<sub>s↓</sub>= Radiación de onda corta entrante (W/m<sup>2</sup>)

α = Albedo de la superficie (adimensional)

R<sub>L↓</sub>= Radiación de onda larga entrante (W/m<sup>2</sup>)

R<sub>L↑</sub>= Radiación de onda larga saliente emitida(W/m<sup>2</sup>)

ε<sub>o</sub>= Emisividad térmica de la superficie (adimensional)

El flujo de calor de suelo (G), es considerado como el calor almacenado tanto en suelo como en la vegetación debido a la conducción. Este componente del balance de energía se estimó mediante las funciones empíricas desarrolladas por (Tasumi, 2003):



$$\frac{G}{Rn} = 0.05 + 0.18e^{-0.521 LAI} \quad (LAI \geq 0.5) \quad (4.a)$$

$$\frac{G}{Rn} = 1.80 \frac{(T_s - 273.16)}{Rn} + 0.084 \quad (LAI < 0.5) \quad (4.b)$$

Donde:

$T_s$  = Temperatura superficial en grados kelvin (°K)

LAI = Índice de área foliar (adimensional)

El flujo de calor sensible (H) es considerado la tasa de pérdida de calor hacia el aire por convección y conducción, debido a una diferencia de temperatura. La estimación de H se determinó mediante la siguiente función:

$$H = \frac{(\rho \times C_p \times dT)}{r_{ah}} \quad (5)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad del aire (Kg/m<sup>3</sup>)

$C_p$  = Calor específico de aire (1004/J/Kg/K)

$dT$  = Diferencia en temperatura ( $T_1 - T_2$ ) entre dos alturas ( $Z_1$  y  $Z_2$ ) en °K

$r_{ah}$  = Resistencia aerodinámica al transporte de calor (s m<sup>-1</sup>)

La ecuación del calor sensible presenta dos incógnitas ( $r_{ah}$  y  $dT$ ). Para facilitar este cálculo, utilizamos dos píxeles de "anclaje" (píxel frío y caliente), donde se estiman los valores confiables de H y resolvemos para  $dT$  que satisface la ecuación dada la rugosidad aerodinámica y la velocidad del viento a una altura determinada.

METRIC y SEBAL utilizan un proceso iterativo para corregir la inestabilidad atmosférica debida a los efectos de flotabilidad del calentamiento de la superficie.

Después de determinar los componentes del balance de energía ( $R_n$ , H y G), se estimó el flujo de calor latente (LE) haciendo uso de la ecuación (1), la ET instantánea ( $ET_{inst}$ ) y la fracción de ET de referencia ( $ET_r$ ) se calcularon aplicando las siguientes funciones:

$$ET_{inst} = 3600 \frac{LE}{\lambda} \quad (6)$$

Donde:

$ET_{inst}$  = Evapotranspiración instantánea (mm/hr)

3600 = Conversión del tiempo en segundos a horas

$\lambda$  = Calor latente de vaporización (J/Kg), este se calculó como

$$\lambda = [2.501 - 0.00236(T_s - 273)] \times 10^6 \quad (7)$$

Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar determinado por el método propuesto por Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura





(FAO). La determinación de la evapotranspiración del cultivo de maíz se realizó mediante la función:

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (8)$$

Donde:

ET<sub>c</sub>= Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (mm/día)

K<sub>c</sub>= Coeficiente del cultivo (adimensional)

ET<sub>o</sub>= Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día)

El coeficiente del cultivo (K<sub>c</sub>) se determinó de datos tabulares recomendados en el manual de FAO 56 (Allen, R, G., L.S. Pereira, D. Raes, 1998) y la ET<sub>o</sub> se determinó de los datos medidos en la estación meteorológica usando la función de FAO Penman-Monteith:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (9)$$

Donde:

ET<sub>o</sub>= Evapotranspiración de referencia (mm/día).

R<sub>n</sub>= Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)

G= Flujo de calor de suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)

T = Temperatura media del aire a 2 m de altura (° C)

u<sub>2</sub> = Velocidad del viento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>)

e<sub>s</sub> = Presión de vapor a saturación (kPa)

e<sub>a</sub>= Presión real de vapor (kPa)

(e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>) = Déficit de presión de vapor (kPa)

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>)

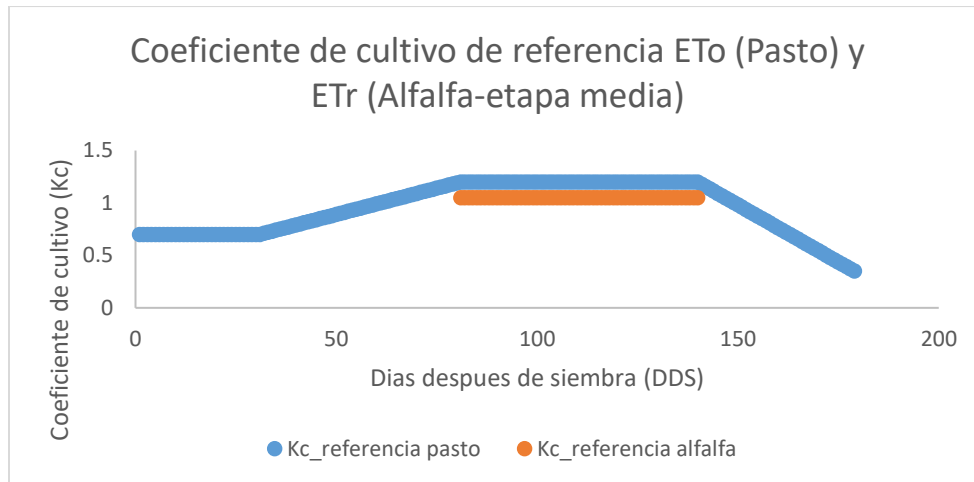
γ = Constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>)

## Resultados y Discusión

### Estimación de la ET<sub>c</sub> por el método de FAO

El coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) para maíz en la etapa media, con base en lo reportado en el manual de FAO-56, es igual a 1.20. La duración de esta etapa es de 60 días, considerando un maíz con ciclo total de 180 días, es decir, dentro del rango que comprenden las fechas del 3 de febrero al 4 de abril del 2022.

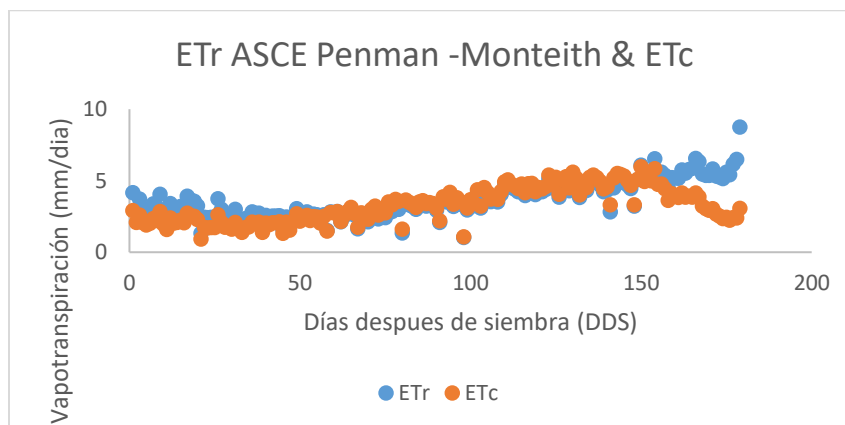
Trout & DeJonge, 2018 reportaron un valor de K<sub>c</sub> de 1.05 para la etapa media del maíz relacionado a la evapotranspiración referencia de la alfalfa (E<sub>Tr</sub>).



**Figura 4.** Gráfico de los coeficientes de cultivo (Pasto y Alfalfa) para el cultivo de Maíz en la etapa media.

Con base en la figura 4, se observa que el Kc del cultivo de maíz para la referencia de alfalfa es menor que la de referencia del pasto. En general, la ET de referencia para un cultivo de porte alto como la alfalfa es de aproximadamente 1.1 a 1.4 veces la de un cultivo de porte bajo como el pasto (ETo) durante los meses de verano debido a la mayor rugosidad, mayor área foliar, menor  $G$  (flujo de calor del suelo) y menor  $r_s$  (resistencia superficial) de la alfalfa (Jensen & Allen, 2016).

Se determinó la  $ET_c$  y la  $ET_r$  con la ecuación de ASCE Penman-Monteith estandarizada para todo el ciclo de cultivo (figura 5).



**Figura 5.**  $ET_c$  y  $ET_r$  para el ciclo completo de maíz en Fundación Produce Sinaloa.

Se observa en el gráfico que en el 80 DDS (inicio de etapa media) y 140 DDS (fin de la etapa media), la  $ET_c$  supera a la  $ET_r$ . Asimismo, se alcanzó la máxima ET del cultivo del maíz al final de la etapa media con un valor aproximado de ~~los~~ 6 mm/día.

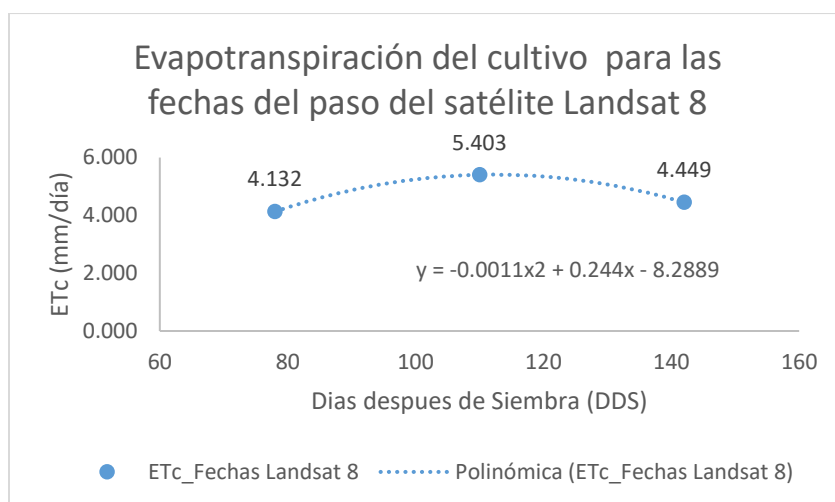
## Estimación de la ETc por el modelo METRIC (Balance de energía) e implementado en la plataforma Google Earth Engine.

Tres imágenes fueron las que cubrieron el periodo de la etapa media del cultivo de maíz y para cada una de estas escenas se determinaron los valores de cada uno de los elementos del balance de energía como se presenta en el cuadro 1.

**Cuadro 1.** Resultados de la determinación de los elementos del balance de energía (Rn, G, H y LE), cálculo de la fracción de la Evapotranspiración (ETrF) y la ETc cada paso de imagen haciendo uso del modelo METRIC e imágenes Landsat 8.

Fecha de imagen	DDS	Rn(W/m2)	G(W/m2)	H(W/m2)	LE(W/m2)	ETrF	ETc (mm/día)
31-ene-22	78	442.452	32.907	88.658	320.886	0.914	4.132
04-mar-22	110	537.336	47.974	52.115	437.246	0.910	5.403
05-abr-22	142	604.106	75.469	255.941	272.696	0.830	4.449

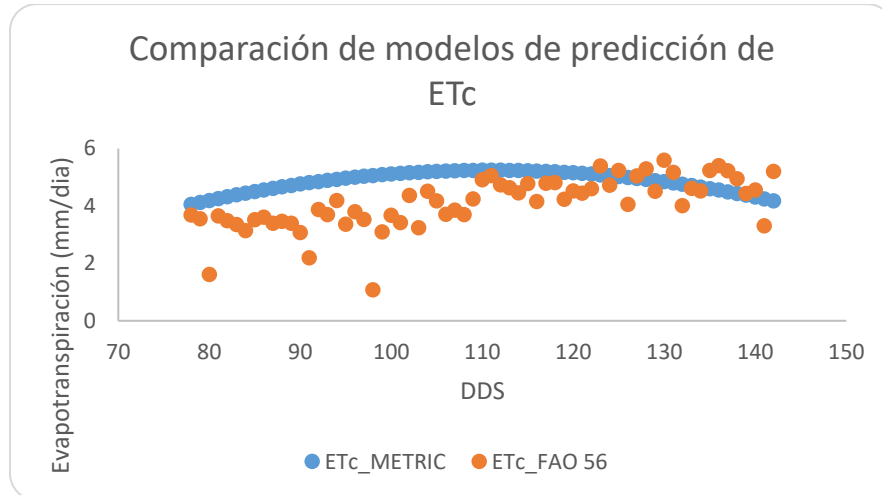
Se determinó la ETc para cada día del periodo de evaluación (etapa media) mediante un modelo de ajuste polinómico de grado 2 (figura 6).



**Figura 6.** Ajuste de modelo polinómico de grado 2 de la ETc derivada del modelo METRIC e imágenes Landsat 8.

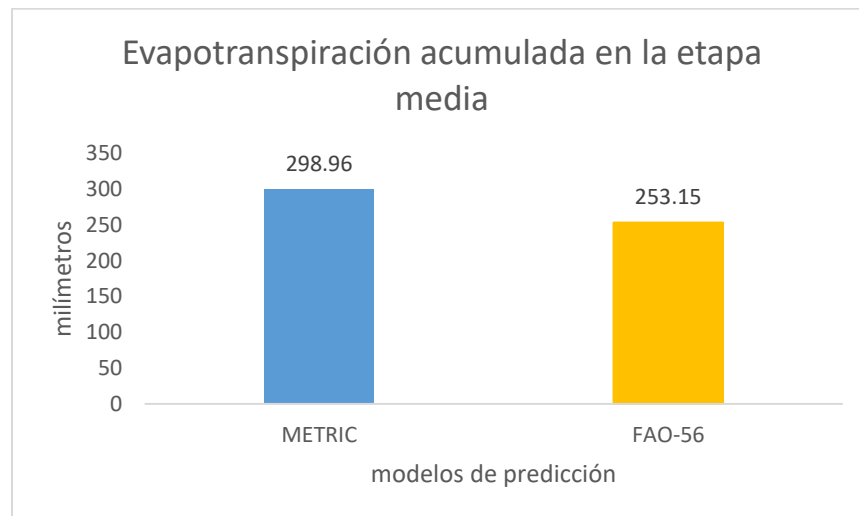
### Comparación de modelos de estimación de ETc.

En la figura 7, se observa que el modelo de ajuste generado con los resultados del modelo METRIC sobreestima en los primeros 30 días y se presenta un mejor ajuste los últimos 30 días de la etapa, esto probablemente debido a la insuficiencia de imágenes de Landsat 8 disponibles en el periodo (3 imágenes), con lo cual se construyó el modelo de ajuste presentando una curva suavizada (figura 6).



**Figura 7.** Análisis del desempeño de los modelos de predicción de ETc (METRIC vs FAO-56).

La evapotranspiración acumulada es presentada en la figura 8, donde se observa que el modelo METRIC sobreestima en un 18% el acumulado estimado con el modelo FAO-56.



**Figura 8.** Acumulado de la ETc en la etapa media del maíz con dos modelos de predicción.

La Raíz del Error Cuadrático Medio (RECM) fue de 1.15 mm día<sup>-1</sup> del modelo METRIC, considerando datos observados a los valores del método de FAO-56.

El sesgo medio del error (MBE, por sus siglas en inglés) fue de 0.74 mm/día y porcentaje de sesgo (PBIAS, siglas en inglés) de -18.08. El valor óptimo de PBIAS es cero. Una magnitud baja indica una simulación precisa del modelo.

Los valores positivos indican un sesgo de subestimación del modelo y los valores negativos indican un sesgo de sobreestimación del modelo.

En investigaciones previas para Maíz, se han observado sobreestimaciones usando modelos basados en sensores remotos, en específico METRIC mostró un RECM de 1.2



mm día<sup>-1</sup> con un valor relativo sobreestimado del 26%. Los modelos de balance de energía podrían utilizarse en herramientas de apoyo a la toma de decisiones en agricultura de precisión para simular la ET<sub>c</sub> diaria y proporcionar información para optimizar la gestión del riego. (Xue et al., 2020)

encontraron que el valor estimado con METRIC fue mayor al registrado en un atmómetro (9.7 mm día<sup>-1</sup> y 8 mm día<sup>-1</sup>, respectivamente) para la etapa media del cultivo de maíz. Los errores resultantes en todo el ciclo fenológico del cultivo de maíz oscilaron en el rango de 4 a 17% con un RECM de 0.74 mm día<sup>-1</sup>.

## Conclusiones

El modelo METRIC basado en un balance de energía e implementado en la plataforma de Google Earth Engine sobreestima los resultados estimados con el método de FAO56. Los resultados pueden mejorar al aumentar el número de imágenes útiles (libre de nubes) en la etapa media del cultivo.

El valor del K<sub>c</sub> (ET<sub>rF</sub>) para la etapa media del maíz evaluado en este experimento presentó un valor máximo de 0.91 el cual no alcanzó el máximo reportado en la literatura (1.05).

No se realizó la evaluación cuantitativa de la implementación de los algoritmos del balance de energía del modelo METRIC en la plataforma en la nube Google Earth Engine, pero de manera cualitativa se puede concluir que los procesamientos, la automatización y los resultados tanto temporales y espaciales mejoran sustancialmente.

## Referencias Bibliográficas

- Allen, R. G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. S. (1998). Crop evapotranspiration. In *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*.
- Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J. L., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I., & Robison, C. W. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 395–406. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2007\)133:4\(395\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(395)).
- Allen, R., Morton, C., Kamble, B., Kilic, A., Huntington, J., Thau, D., Gorelick, N., Erickson, T., Moore, R., Trezza, R., Ratcliffe, I., & Robison, C. (2015). EEFlux: A landsat-based evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. *Joint ASABE/IA Irrigation Symposium 2015: Emerging Technologies for Sustainable Irrigation*, 7004(November), 424–433. <https://doi.org/10.13031/irrig.20152143511>.
- Anderson, M. C., Kustas, W. P., Norman, J. M., Hain, C. R., Mecikalski, J. R., Schultz, L.,





- González-Dugo, M. P., Cammalleri, C., D'Urso, G., Pimstein, A., & Gao, F. (2011). Mapping daily evapotranspiration at field to continental scales using geostationary and polar orbiting satellite imagery. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1), 223–239. <https://doi.org/10.5194/hess-15-223-2011>
- Conagua. (2021). *Monitor de sequía en México al 31 de mayo del 2021*. [https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Sequía/Monitor de sequía en México/Seguimiento de Sequía/MSM20210531.pdf](https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Sequía/Monitor%20de%20sequía%20en%20México/Seguimiento%20de%20Sequía/MSM20210531.pdf)
- 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>.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Hsiao, T. C., Steduto, P., & Fereres, E. (2007). A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrigation Science*, 25(3), 209–231. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0063-2>.
- Jensen, M. E., & Allen, R. G. (2016). Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements. In *Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements* (Issue 70). <https://doi.org/10.1061/9780784414057>.
- 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). <https://doi.org/10.3390/rs13193884>.
- Khan, A., Stöckle, C. O., Nelson, R. L., Peters, T., Adam, J. C., Lamb, B., Chi, J., & Waldo, S. (2019). Estimating biomass and yield using metric evapotranspiration and simple growth algorithms. *Agronomy Journal*, 111(2), 536–544. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.04.0248>.
- 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(April), 81–96. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.018>.
- Lima, J. G. A., Sánchez, J. M., Piqueras, J. G., Sobrinho, J. E., Viana, P. C., & Alves, A. S. (2020). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental Evapotranspiration of sorghum from the energy balance by METRIC and STSEB Evapotranspiração do sorgo a partir do balanço de energia por METRIC e STSEB*. 24–30.
- Pôças, I., Paço, T. A., Cunha, M., Andrade, J. A., Silvestre, J., Sousa, A., Santos, F. L.,



- Pereira, L. S., & Allen, R. G. (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-González, A., Kjaersgaard, J., Trooien, T., Hay, C., & Ahiablame, L. (2017). Comparative Analysis of METRIC Model and Atmometer Methods for Estimating Actual Evapotranspiration. *International Journal of Agronomy*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3632501>.
- Reyes-González, A., Kjaersgaard, J., Trooien, T., Reta-Sánchez, D. G., Sánchez-Duarte, J. I., Preciado-Rangel, P., & Fortis-Hernández, M. (2019). Comparison of leaf area index, surface temperature, and actual evapotranspiration estimated using the METRIC model and in situ measurements. *Sensors (Switzerland)*, 19(8). <https://doi.org/10.3390/s19081857>.
- Tasumi, M. (2003). Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. *PhD Thesis*, 357.
- Trout, T. J., & DeJonge, K. C. (2018). Crop Water Use and Crop Coefficients of Maize in the Great Plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0001309](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001309).
- Wright, J. L., & Jensen, M. E. (1972). Peak Water Requirements of Crops in Southern Idaho. *ASCE J Irrig Drain Div*, 98(IR2), 193–201. <https://doi.org/10.1061/jrcea4.0013020>.
- Xue, J., Bali, K. M., Light, S., Hessels, T., & Kisekka, I. (2020). Evaluation of remote sensing-based evapotranspiration models against surface renewal in almonds, tomatoes and maize. *Agricultural Water Management*, 238(April), 106228. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106228>.