

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE BASAL DE CULTIVO (K_{cb}) DEL MAÍZ FORRAJERO POR TELEDETECCIÓN EN EL NORTE DE MÉXICO

Gerardo Delgado Ramírez^{1*}; Martín Alejandro Bolaños González¹; Abel Quevedo Nolasco¹; Adolfo López Pérez¹; Juan Estrada Ávalos²

¹Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco Km 36.5, Montecillo, Texcoco, C.P. 56264, Estado de México, México.

delgado.gerardo@colpos.mx (*Autor de correspondencia)

²INIFAP-Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA). Margen Derecha Canal Sacramento Km 6.5, Zona Industrial Gómez Palacio, C.P. 35150, Durango, México.

Resumen

La metodología del coeficiente de cultivo (K_c) se utiliza ampliamente para estimar la evapotranspiración del cultivo (ET_c). El coeficiente basal de cultivo (K_{cb}) representa la línea base potencial del valor de K_c , y su relación con índices de vegetación calculados con información espectral es la más usada para su estimación. Las imágenes multispectrales del satélite Sentinel-2 es una alternativa al método FAO-56 para calcular el K_{cb} , por lo que en este trabajo se evaluaron nueve algoritmos, seis que utilizan el índice NDVI y tres el SAVI, para determinar el K_{cb} del maíz forrajero durante el ciclo vegetativo en dos parcelas con distinta fuente de agua y diferente manejo de riego. Los valores de K_{cb} estimados variaron en un rango de 0.13 a 1.12; de manera general sobrestimaron los valores de tablas del Manual FAO-56 en la etapa inicial y los subestimaron en la etapa final. El algoritmo Campos K_{cbNDVI} fue el método que presentó los mejores estadísticos para estimar el K_{cb} del maíz forrajero para las dos diferentes condiciones del riego parcelario; tanto en cada una de sus etapas de crecimiento, como en la totalidad de su ciclo de cultivo obteniendo una precisión promedio de 88%.

Palabras claves: índices de vegetación, imágenes satelitales, *Zea mays*, Manual FAO-56.

Introducción

El procedimiento descrito en el Manual FAO-56 es el más utilizado para el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos (ET_c), consiste en el producto de un coeficiente de cultivo (K_c) por la evapotranspiración de referencia (ET_0) (Allen *et al.*, 2006). Wright (1982) propuso el método dual, siendo el K_c producto del coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) y el coeficiente asociado con la evaporación del suelo (K_e). En la actualidad se emplea ampliamente el K_{cb} para estimar la ET_c , que representa la línea base potencial del valor de K_c (Allen *et al.*, 2006). La principal referencia en el tema es el compendio del Manual FAO-56; sin embargo, tiene ciertas limitaciones, ya que solo proporciona valores de K_{cb} en tres etapas principales para cada cultivo y solo en condiciones estándar, las cuales son inexistentes en aplicaciones reales (Mhaweji *et al.*, 2021).

La metodología del K_c se utiliza ampliamente para estimar la ET_c y programar el riego (Escarabajal *et al.*, 2015). No obstante, su aplicación requiere la determinación de los K_{cb} para cada cultivo y etapa de desarrollo, para lo que existen un número importante de métodos, muchos de los cuales son laboriosos, destructivos y costosos en términos de tiempo y dinero. Por ello, se ha optado por simplificar su determinación empleando su relación con la reflectividad de la cubierta del cultivo (Neale *et al.*, 1989). Actualmente existe un amplio número de ecuaciones o algoritmos que estiman el K_{cb} para cultivos herbáceos utilizando índices de vegetación como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), que son los más usados por su facilidad de cálculo y derivables a partir de un sensor multispectral (Candiago *et al.*, 2015). Las nuevas misiones satelitales han despertado un gran interés en la comunidad científica debido a sus múltiples aplicaciones, así como su alta resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica (Borràs *et al.*, 2017), siendo las más utilizadas las que son de distribución gratuita y fácil acceso como el satélite Sentinel-2.

La Región Lagunera, en la que se encuentra el Distrito de Riego 017 (DR 017), es una de las principales cuencas lecheras a nivel nacional, y su ganado es alimentado fundamentalmente con alfalfa, ensilaje y concentrados; siendo el ensilaje de maíz el más común entre éstos, ya que puede constituir de 30% al 40% de la ración (en base seca) de vacas de producción (González *et al.*, 2005). Además, el maíz forrajero es un cultivo con alta productividad y buen valor energético (Núñez *et al.*, 2003). Lo anterior ha provocado que en los últimos años se incrementen las áreas sembradas con este cultivo, ya que, además, es uno de los forrajes que requieren menos agua (Arreola *et al.*, 2016). En los últimos cuatro años ha sido el principal cultivo en la región con una superficie actual de 54000 ha de una superficie de riego total de 167000 ha (Reyes *et al.*, 2022).

La región dispone de dos fuentes de agua para el riego de cultivos: superficial (agua de río) y subterránea (agua de pozo), pero ambas fuentes están limitadas y con poca disponibilidad; lo que obliga a los productores a implementar estrategias para incrementar el uso eficiente del agua de riego como: rehabilitación de canales, construcción de estanques, nivelación de tierras, tecnificación del riego parcelario, etc. Sin embargo,

todos estos esfuerzos no tendrán los mejores resultados sino se parte del principio de aplicar sólo los requerimientos hídricos de los cultivos. Por lo que, es importante realizar estimaciones prácticas y operativas del K_{cb} durante todo el ciclo vegetativo, para posteriormente calcular la ET_c y luego programar los riegos haciendo un uso eficiente del agua.

El uso de información espectral de imágenes de satélite Sentinel-2 es una alternativa al método de FAO-56 para calcular el K_{cb} , por lo que en este trabajo se evaluaron nueve algoritmos, seis que utilizan el índice NDVI y tres el SAVI, para estimar el K_{cb} del maíz forrajero durante todo el ciclo vegetativo en dos parcelas con distinta fuente de agua y diferente manejo de riego, identificando cuáles de los algoritmos utilizados presentan las mejores precisiones al compararlo con el K_{cb} obtenido de tablas del Manual FAO-56.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó durante el ciclo primavera – verano 2021 en dos parcelas de maíz forrajero ubicadas en el municipio de Francisco I. Madero, Coahuila. Ambas parcelas forman parte de la superficie de riego del Módulo XII del DR 017 Región Lagunera (Cuadro 1; Figura 1).

Cuadro 1. Localización geográfica, fechas de siembra y cosecha, y características principales de las parcelas de estudio.

	Parcela 1	Parcela 2
Latitud	25° 46' 44.86" N	25° 47' 17.44" N
Longitud	103° 18' 48.65" O	103° 18' 15.96" O
Híbrido	N83N5 (SYNGENTA)	8576 (ABT)
Fecha de siembra	26 de febrero 2021	09 de abril 2021
Fecha de cosecha	28 de junio 2021	09 de agosto 2021
Fuente de agua	Superficial y Subterránea	Superficial
Superficie de riego (ha)	11.41	6.32
Tipo de sistema de riego	Válvulas Alfalferas	Gravedad
Textura de suelo predominante	Franco Arcillo-Limoso	Arcilloso

En ambas parcelas se establecieron siete semillas por metro lineal y una separación entre surco de 0.76 m; resultando una densidad de siembra de alrededor de 92 mil plantas por hectárea. En la Parcela 1 se aplicaron un total de cinco riegos, un riego de presiembra y cuatro riegos de auxilio. Este predio dispone de derechos de agua superficial (río) y subterránea (pozo), el riego de presiembra y primer auxilio se aplicó con agua de pozo y para el resto de los riegos se utilizó agua de río. En la Parcela 2 solamente empleó agua superficial, aplicando un riego de presiembra y dos riegos de auxilio durante el ciclo vegetativo.

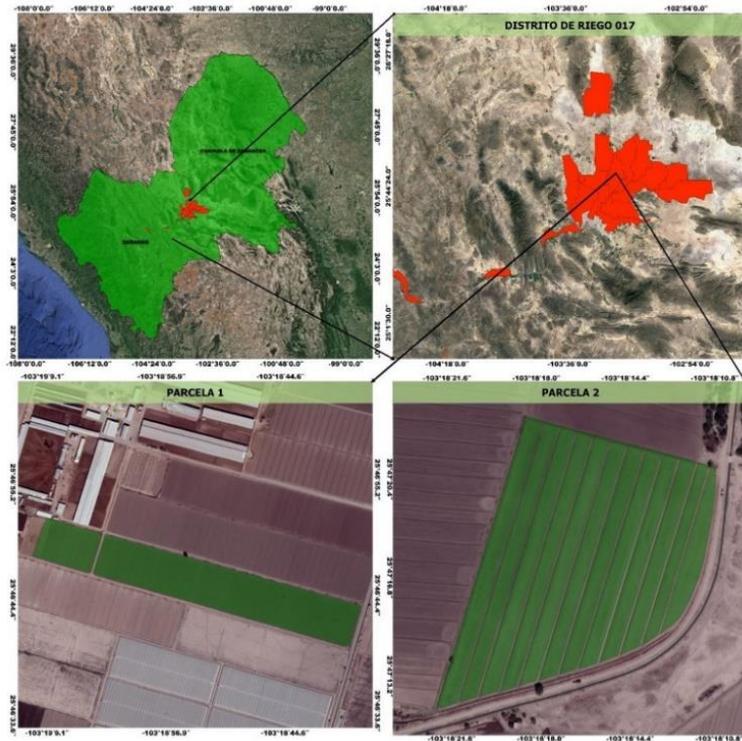


Figura 1. Localización del área de estudio.

Descarga y procesamiento de las imágenes de satélite

Se utilizaron 26 imágenes multispectrales de los satélites Sentinel 2A y 2B sin nubosidad, las cuales cubrieron satisfactoriamente el ciclo vegetativo del maíz en las dos parcelas de estudio. Estos satélites proporcionan datos radiométricos a través de 13 bandas: cuatro bandas espectrales de resolución espacial de 10 m, seis de 20 m y tres de 60 m; a una escala temporal de cinco días. Las imágenes se descargaron de forma gratuita en el sitio web Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) con un nivel de procesamiento 2A (imágenes ortorectificadas y corregidas atmosféricamente).

Posteriormente, se recortaron los polígonos de interés en ambas parcelas utilizando el *software* de libre acceso QGIS v. 3.10.6. Para ello, se seleccionó una melga por parcela; la melga de la Parcela 1, con longitud de 125 m y ancho de 20 m y la melga de la Parcela 2 presentó el mismo ancho de melga con una longitud de 290 m. Por consiguiente, las superficies de estudio fueron de 2500 y 5800 m², respectivamente. Ambas superficies corresponden a 23 píxeles para la melga de la Parcela 1 y 55 píxeles para la melga de la Parcela 2.

Cálculo de los índices NDVI y SAVI

Para estimar el K_{cb} del maíz forrajero mediante teledetección utilizando los algoritmos mencionados en el Cuadro 2, es indispensable calcular los índices de vegetación (NDVI

y SAVI). El NDVI (Rouse *et al.*, 1974) se calculó con la ecuación 1 para cada escena en el área de interés.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Donde, *NDVI* es el índice de vegetación de diferencia normalizada (adimensional); *NIR* es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (%); y *R* es la reflectancia en la banda del rojo (%). De acuerdo con las bandas espectrales que contienen las imágenes Sentinel-2; B8 corresponde a la banda *NIR* y B4 a la banda *R*, ambas con una resolución espacial de 10 m.

Con relación al índice SAVI (Huete, 1988), este se calculó con la ecuación 2.

$$SAVI = \frac{(1 + L) * (NIR - R)}{(NIR + R + L)} \quad (2)$$

Donde, *L* es un factor de corrección del brillo del suelo, que minimiza la influencia del suelo en la reflectancia del dosel, por lo que varía inversamente con la cantidad de vegetación presente (Qi *et al.*, 1994); de tal forma que, ante suelos con presencia de desarrollo vegetativo, el factor *L* pasa a valor de cero sin alterar la ecuación y haciéndola equivalente a la ecuación del NDVI. Para este estudio, en las dos parcelas se utilizaron valores de *L* de 0.10 a 0.30 durante los primeros 50 días después de la siembra (DDS) en la Parcela 1 y 63 DDS en la Parcela 2. El resto del ciclo en ambas parcelas se empleó el valor de cero; ya que en esta etapa de cultivo presentaba mayor cobertura vegetal.

Se estimaron las medidas de tendencia central (promedio y moda) de los índices antes mencionados a nivel melga mediante el complemento “Zonal Statistics” (instalado en QGIS v. 3.10.6). Dichos valores se compararon con los valores de tablas del coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) de maíz proporcionados en el Manual FAO-56.

Elaboración de la curva K_{cb} de maíz con las tablas del Manual FAO-56

Para la elaboración de la curva de K_{cb} del maíz forrajero se consultaron las tablas del Manual FAO-56 (Allen *et al.*, 2006), presentando valores de K_{cb} en la etapa inicial ($K_{cb\ ini}$), media ($K_{cb\ med}$) y final ($K_{cb\ fin}$) de 0.15, 1.15 y 0.50, respectivamente. Este último valor de K_{cb} corresponde a la condición cuando el cultivo se cosecha con alto porcentaje de humedad en el grano o para forraje, como fue el caso. Estos valores de K_{cb} de tablas son para climas subhúmedos para condiciones de humedad relativa mínima (HR_{\min}) de 45% y velocidad del viento (*VV*) de 2 m s^{-1} . Por ende, se realizó un ajuste a los K_{cb} en las dos parcelas de estudio, tanto en las etapas media y final en base a la metodología descrita en el Manual FAO-56. En la Parcela 1 se determinaron valores de K_{cb} de 1.18 y 0.52 para las etapas de mediados y final, respectivamente. Con respecto a la Parcela 2 se utilizaron los mismos valores de K_{cb} de tablas en todas las etapas de crecimiento; ya que no se presentaron diferencias entre los K_{cb} ajustados y K_{cb} de tablas tanto en la etapa de mediados y final.

Con referente a la duración de las etapas de crecimiento del maíz forrajero, también se determinó mediante las tablas del Manual FAO-56, obteniendo valores para ambas parcelas de estudio de 31, 51, 30 y 10 días de duración para las etapas: inicial, desarrollo, mediados y final, respectivamente.

Estimación del coeficiente basal de cultivo (K_{cb}) con índices de vegetación

Para la estimación del K_{cb} del maíz forrajero se emplearon nueve algoritmos (Cuadro 2), de acuerdo a la literatura seis algoritmos se generaron para maíz forrajero, y el resto para trigo (ecuación 4) y uva (ecuación 7), considerados como cultivos herbáceos como el maíz. Para emplear las ecuaciones (8), (11) y (13) se calculó la línea de suelo ($NDVI_{min}$ y $SAVI_{min}$), que separa la superficie del suelo desnudo con la vegetación (Rukhovich *et al.*, 2016). La línea de suelo se obtuvo mediante la regresión lineal simple de la banda roja “R” (variable independiente) y la infrarroja cercana “NIR” (variable dependiente), utilizando únicamente los píxeles que están dentro de las parcelas y de un umbral de suelo desnudo. Primero, se realizó la regresión lineal de las 26 imágenes descargadas del satélite Sentinel-2 (con resolución radiométrica de 12 bits); las cuales cubren totalmente el ciclo fenológico del maíz forrajero de las dos parcelas de estudio, siendo la imagen del 02 de abril de 2021 la que presentó el mayor valor de R^2 (0.88) mostrándose su relación en la ecuación 3.

$$NIR = 1.308 * R + 56.07 \tag{3}$$

Donde, el valor “1.308” representa la pendiente y “56.07” es la ordenada al origen.

Con esta relación y con los complementos del programa QGis v. 3.10.6 (“RasterDataPlotting” y “QuickWKT”) se obtuvieron las siguientes líneas de suelo de 0.10 para NDVI ($NDVI_{min}$) y 0.12 para SAVI ($SAVI_{min}$).

Las ecuaciones lineales (9) y (10) se obtuvieron mediante una regresión lineal simple entre el NDVI promedio de las dos parcelas de estudio (delimitación por melga) y el valor de K_{cb} de tablas del Manual FAO-56. Ambas ecuaciones se ajustaron con ordenada al origen en las coordenadas nulas. La ecuación (9) se utilizó para estimar el K_{cb} del maíz forrajero en la Parcela 1 y la expresión (10) se empleó para la Parcela 2. Esto acorde a las diferencias de fechas de siembra y manejo de riego entre ambas parcelas de estudio.

Cuadro 2. Algoritmos utilizados para calcular K_{cb} del maíz forrajero mediante índices de vegetación (IV).

Algoritmos	IV	Ecuación	Fuente
Choudhury K_{cbNDVI}	NDVI	(4) $K_{cb} = 1.25 * NDVI + 0.20$	Choudhury <i>et al.</i> , (1994)
Glez-Piqueras K_{cbNDVI}	NDVI	(5) $K_{cb} = 1.22 * NDVI + 0.15$	González-Piqueras <i>et al.</i> , (2005)
Calera y Glez K_{cbNDVI}	NDVI	(6) $K_{cb} = 1.15 * NDVI + 0.17$	Calera y González (2007)
Campos K_{cbNDVI}	NDVI	(7) $K_{cb} = 1.44 * NDVI - 0.10$	Campos <i>et al.</i> , (2010)
Argolo K_{cbNDVI}	NDVI	(8) $K_{cb} = K_{cmax} \left[1 - \left(\frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^n \right]$	Argolo <i>et al.</i> , (2020)
Allen FAO-56 K_{cbNDVI}	NDVI	(9) $K_{cb} = 1.50 * NDVI$	Allen <i>et al.</i> , (2006)
		(10) $K_{bc} = 1.21 * NDVI$	

Glez-Dugo K_{cbSAVI}	SAVI	(11) $K_{cb} = \left(\frac{K_{cmax}}{f_{ceff}} \right) * \left(\frac{SAVI - SAVI_{suelo}}{SAVI_{max} - SAVI_{suelo}} \right)$	González-Dugo <i>et al.</i> , (2009)
Glez-Piqueras K_{cbSAVI}	SAVI	(12) $K_{cb} = 1.60 * SAVI + 0.21$	González-Piqueras <i>et al.</i> , (2005)
Argolo K_{cbSAVI}	SAVI	(13) $K_{cb} = K_{cmax} \left[1 - \left(\frac{SAVI_{max} - SAVI}{SAVI_{max} - SAVI_{min}} \right)^n \right]$	Argolo <i>et al.</i> , (2020)

Donde, K_{cmax} es el coeficiente del cultivo del maíz en la etapa media; $NDVI_{max}$ es el valor máximo de NDVI de la escena; $NDVI_{min}$ es el valor de NDVI en la línea de suelo (0.10); n es un coeficiente relacionado con la arquitectura foliar del cultivo, para NDVI se asume el valor de 0.5 y 1.0 para SAVI; f_{ceff} es la fracción de cobertura efectiva del suelo (0.80); $SAVI_{max}$ es el valor máximo de SAVI de la escena; $SAVI_{suelo}$ o $SAVI_{min}$ es el valor de suelo desnudo (0.12).

Análisis estadístico

Para evaluar la precisión de los K_{cb} estimados del maíz forrajero con respecto a los K_{cb} de tablas del Manual FAO-56, se utilizaron tres indicadores estadísticos: a) coeficiente de determinación (R^2), el cual refleja la bondad de ajuste de un modelo a la variables que pretende explicar (ecuación 14); b) cuadrado medio del error (CME) que mide la variación de los valores calculados respecto a los observados (ecuación 15); y c) error relativo promedio (ERP), que indica de forma porcentual de la aproximación del valor estimado con respecto al valor real (ecuación 16).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_{iobt} - \overline{y_{iobt}})(y_{iest} - \overline{y_{iest}})}{\left(\sum_{i=1}^n (y_{iobt} - \overline{y_{iobt}})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^n (y_{iest} - \overline{y_{iest}})^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (14)$$

$$CME = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{iest} - y_{iobt})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$ERP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|y_{iobt} - y_{iest}|}{y_{iobt}} \right) * 100 \quad (16)$$

Donde, y_{iobt} son los datos de K_{cb} obtenidos de tablas del Manual FAO-56; $\overline{y_{iobt}}$ es el promedio de los datos de K_{cb} obtenidos de tablas del Manual FAO-56; y_{iest} son los datos de K_{cb} estimados con los algoritmos que utilizan IV; $\overline{y_{iest}}$ es el promedio de los datos de K_{cb} estimados con los algoritmos propuestos en este estudio, los cuales utilizan IV e imágenes satelitales Sentinel-2; n es el número de observaciones.

Resultados y Discusión

En el Cuadro 3 se presenta la comparación del K_{cb} estimado por los algoritmos utilizados en esta investigación y el K_{cb} obtenido del Manual FAO-56 durante las etapas inicial, desarrollo, media y final del cultivo maíz forrajero establecido en la Parcela 1. Se observa

que la medida de tendencia central que presentó menores valores de error en el cálculo del K_{cb} en todos los algoritmos utilizados, fue el promedio a nivel melga. También, se distingue que el algoritmo Campos K_{cbNDVI} presentó menor valor de CME tanto en la etapa inicial ($K_{cb\ ini}$) como en la etapa de desarrollo ($K_{cb\ des}$). Con referencia a la etapa media ($K_{cb\ med}$), el que presentó menor valor de CME fue el algoritmo Glez-Dugo K_{cbSAVI} y en la etapa final ($K_{cb\ fin}$) el algoritmo Glez-Piqueras K_{cbNDVI} . Al considerar las cuatro etapas de crecimiento del maíz forrajero, los algoritmos Allen FAO-56 K_{cbNDVI} y Argolo K_{cbSAVI} mostraron los menores valores de CME. Sin embargo, el algoritmo Campos K_{cbNDVI} presentó en cada una de las etapas de crecimiento valores menores del 22% de ERP y en todo el ciclo vegetativo un ERP de 11.6%, logrando una precisión de 88.4%, la cual resultó satisfactoria para estimar ET_c mediante índices de vegetación, ya que según Alfieri *et al.*, (2017) es requisito una precisión del 80%.

Cuadro 3. Comparación del K_{cb} calculado por los algoritmos y el K_{cb} obtenido del Manual FAO-56 durante las etapas de crecimiento del maíz forrajero establecido en la Parcela 1.

Algoritmos	MTC	$K_{cb\ ini}$ (n=6)		$K_{cb\ des}$ (n=7)		$K_{cb\ med}$ (n=6)		$K_{cb\ fin}$ (n=2)		$K_{cb\ ciclo}$ (n=21)		
		CME	ERP	CME	ERP	CME	ERP	CME	ERP	R ²	CME	ERP
Choudhury K_{cbNDVI}	Prom	0.26	170.8	0.20	29.5	0.10	8.2	0.29	29.6	0.92	0.21	19.6
Glez-Piqueras K_{cbNDVI}	Prom	0.20	134.2	0.14	19.3	0.17	14.2	0.12	1.5	0.92	0.18	9.9
Calera y Glez K_{cbNDVI}	Prom	0.21	139.8	0.13	16.9	0.20	16.7	0.21	17.5	0.92	0.18	7.9
Campos K_{cbNDVI}	Prom	0.04	8.3	0.06	2.9	0.26	22.2	0.17	8.8	0.92	0.16	11.6
Argolo K_{cbNDVI}	Prom	0.10	63.9	0.17	23.7	0.47	39.5	0.21	18.1	0.87	0.28	33.6
Allen FAO-56 K_{cbNDVI}	Prom	0.10	59.5	0.10	13.6	0.16	13.2	0.24	21.9	0.92	0.14	4.0
Glez-Dugo K_{cbSAVI}	Prom	0.07	7.4	0.27	37.0	0.06	3.6	0.39	44.4	0.90	0.20	18.2
Glez-Piqueras K_{cbSAVI}	Prom	0.36	239.1	0.44	68.6	0.16	13.6	0.52	60.2	0.90	0.37	50.8
Argolo K_{cbSAVI}	Prom	0.07	25.9	0.09	9.6	0.21	17.1	0.20	15.5	0.90	0.14	5.5

MTC = medida de tendencia central; Prom = promedio; R² = coeficiente de determinación (adimensional); CME = cuadrado medio del error (adimensional); ERP = error relativo promedio (%); n = número de observaciones (imágenes satelitales utilizadas).

En el Cuadro 4 se observa que la moda presentó menor valor de CME en la mayoría de los algoritmos utilizados para calcular el K_{cb} en la Parcela 2, con excepción de las ecuaciones Campos K_{cbNDVI} , Argolo K_{cbNDVI} y Allen FAO-56 K_{cbNDVI} . En estas expresiones, el promedio mostró menor valor de CME. Además, el algoritmo Argolo K_{cbSAVI} presentó menores valores de CME en las etapas inicial ($K_{cb\ ini}$) y desarrollo ($K_{cb\ des}$). Para las etapas $K_{cb\ med}$ y $K_{cb\ fin}$, el menor valor de CME fue Choudhury K_{cbNDVI} . Sin embargo, al considerar todo el ciclo de cultivo del maíz, el algoritmo Argolo K_{cbSAVI} es el que presentó menor valor de CME. Pero, el algoritmo Argolo K_{cbNDVI} presentó valores menores al 13% de ERP en las cuatro etapas de crecimiento del maíz y 8.3% de ERP en todo el ciclo de cultivo, obteniendo una precisión de 91.7%.

Cuadro 4. Comparación del K_{cb} calculado por los algoritmos y el K_{cb} obtenido del Manual FAO-56 durante las etapas de crecimiento del maíz forrajero establecido en la Parcela 2.

Algoritmos	MTC	$K_{cb\ ini}$ (n=3)		$K_{cb\ des}$ (n=10)		$K_{cb\ med}$ (n=3)		$K_{cb\ fin}$ (n=1)		$K_{cb\ ciclo}$ (n=17)		
		CME	ERP	CME	ERP	CME	ERP	CME	ERP	R ²	CME	ERP
Choudhury K_{cbNDVI}	Moda	0.31	202.8	0.14	13.3	0.05	0.7	0.03	3.2	0.92	0.17	15.6
Glez-Piqueras K_{cbNDVI}	Moda	0.25	165.4	0.12	3.4	0.09	7.0	0.04	3.4	0.92	0.14	6.0
Calera y Glez K_{cbNDVI}	Moda	0.26	169.2	0.12	2.0	0.12	9.9	0.07	6.3	0.92	0.15	4.2
Campos K_{cbNDVI}	Prom	0.19	98.9	0.15	19.5	0.09	7.3	0.04	3.5	0.94	0.15	12.3
Argolo K_{cbNDVI}	Prom	0.08	2.6	0.12	9.3	0.14	6.8	0.13	12.1	0.93	0.11	8.3
Allen FAO-56 K_{cbNDVI}	Prom	0.21	121.3	0.14	12.8	0.18	15.5	0.13	11.9	0.94	0.16	6.1
Glez-Dugo K_{cbSAVI}	Moda	0.12	52.8	0.14	13.6	0.19	14.7	0.20	18.5	0.95	0.15	16.0

Glez-Piqueras K_{cbSAVI}	Moda	0.43	285.3	0.33	50.9	0.27	23.1	0.30	27.9	0.95	0.34	49.5
Argolo K_{cbSAVI}	Moda	0.08	22.2	0.10	9.1	0.12	8.2	0.06	5.2	0.95	0.10	7.2

El algoritmo Campos K_{cbNDVI} presentó los menores valores de ERP en las dos parcelas de estudio; tanto por etapa de crecimiento como en la totalidad del ciclo vegetativo, con excepción en las etapas inicial ($K_{cb\ ini}$) y desarrollo ($K_{cb\ des}$) de la Parcela 2. Así, este algoritmo es confiable para estimar el K_{cb} del maíz forrajero con diferente manejo del riego superficial.

Con base a los resultados de los Cuadros 3 y 4 se generaron los mapas de K_{cb} con el algoritmo Campos K_{cbNDVI} en la superficie total de las dos parcelas de estudio (Parcela 1 = 11.41 ha y Parcela 2 = 6.32 ha) a escala de píxel. Dicho algoritmo presentó los mejores índices estadísticos al comparar los K_{cb} estimados con respecto a los K_{cb} de tablas del Manual FAO-56. En la Parcela 1 se observó una variación del K_{cb} en la etapa inicial (día juliano 77) de 0.13 a 0.32; en la etapa de desarrollo (día juliano 107) de 0.25 a 0.59; en la etapa media (día juliano 142) de 0.82 a 1.05 y en la etapa final (día juliano 172) fue de 0.77 a 0.96, como se muestra en la Figura 2.

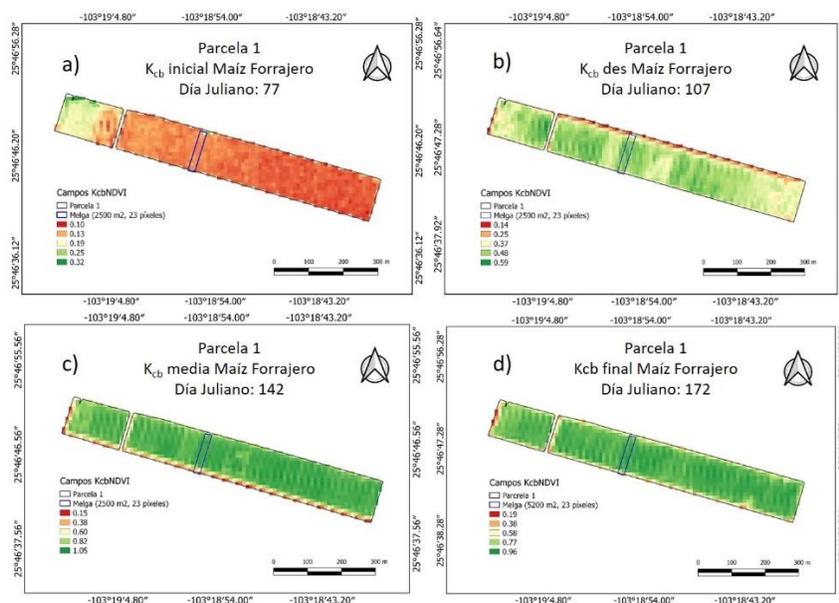


Figura 2. Distribución espacial y temporal del K_{cb} del maíz forrajero establecido en la Parcela 1 en las etapas: a) inicial (77 día juliano), b) desarrollo (107 día juliano), c) media (142 día juliano) y d) final (172 día juliano).

La Parcela 2 presentó variaciones del K_{cb} en la etapa inicial (día juliano 127) de 0.33 a 0.57; en la etapa de desarrollo (día juliano 147) de 0.32 a 0.88; en la etapa media (día juliano 172) de 0.86 a 1.11 y en la etapa final (día juliano 212) de 0.70 a 1.12 (Figura 3). Se observa que la Parcela 2 presentó mayor variación de los valores de K_{cb} en todas las etapas de crecimiento del maíz forrajero, que puede originarse por diferentes factores, de manera individual o combinada, como: tipo de cultivo (híbrido), textura del suelo, manejo de riego o microclima. Estos mapas permiten identificar áreas con estrés por riego

o nutrición deficiente, mal funcionamiento en el sistema de riego u otro estrés ambiental (Knipper *et al.*, 2019).

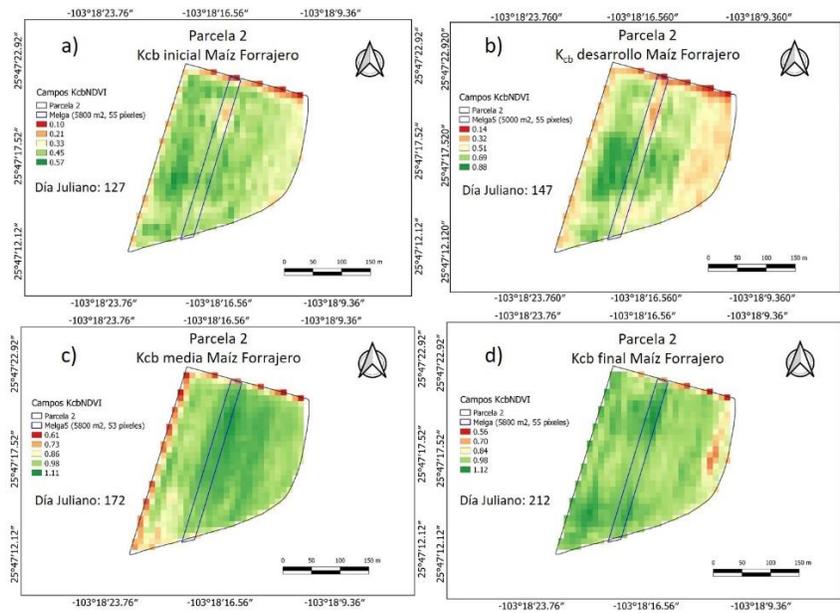


Figura 3. Distribución espacial y temporal del K_{cb} del maíz forrajero establecido en la Parcela 2 en las etapas: a) inicial (127 día juliano), b) desarrollo (147 día juliano), c) media (172 día juliano) y d) final (212 día juliano).

Los K_{cb} estimados por el algoritmo Campos K_{cNDVI} en la Parcela 2 fueron similares a los reportados por Gao *et al.*, (2009) en dos etapas de crecimiento de maíz (inicial y media); presentando valores de 0.36 a 0.37 en la etapa inicial ($K_{cb\ ini}$); de 1.18 a 1.19 en la etapa media ($K_{cb\ med}$); y de 0.22 a 0.28 en la etapa final ($K_{cb\ fin}$). Los valores de esta última etapa fueron diferentes a los reportados a este estudio; ya que los primeros valores de K_{cb} conciernen a maíz de grano. Ojeda *et al.*, (2006) reportaron valores de K_c obtenidos mediante un modelo basado en grados días de desarrollo acumulado (GDD Acum), de 0.05 a 0.30 en V_e ; de 0.40 a 0.45 en V_4 . Para V_T fue entre 1.00 a 1.12; R_1 de 1.15 a 1.25; R_2 de 1.10 a 1.20; R_3 de 1.00 a 1.10 y para R_4 de 0.80 a 1.00. Además, Reyes *et al.*, (2019) encontraron valores de K_{cb} de 0.22 a 0.40 en la etapa $K_{cb\ ini}$; de 1.00 en la etapa $K_{cb\ med}$ y de 0.80 en la etapa $K_{cb\ fin}$ en la misma área de estudio.

Conclusiones

El uso de información espectral de las bandas roja e infrarroja cercana registrada en las imágenes del satélite Sentinel-2 es una alternativa factible y adecuada al método del Manual FAO-56 para calcular el coeficiente basal de cultivo (K_{cb}) para el cultivo de maíz forrajero. Además, combinando el uso de esta tecnología con el levantamiento de información en campo, es posible analizar su comportamiento con mayor detalle y realizar estimaciones más precisas, ya que se cuenta con información específica para el ciclo de cultivo y sitio de estudio, lo que permite dar seguimiento a su evolución en tiempo *cuasi* real y, en consecuencia, realizar la programación del riego en forma oportuna en tiempo y espacio, incrementando la eficacia del uso del agua.

El algoritmo Campos K_{cbNDVI} fue el método que presentó las mejores precisiones para estimar el K_{cb} del maíz forrajero para las dos diferentes condiciones del riego parcelario; tanto en todas sus etapas de crecimiento, como en la totalidad de su ciclo de cultivo obteniendo una precisión promedio de 88%.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el financiamiento de los estudios de doctorado de G. D. R. (Beca No. 765686) y al Laboratorio de Gis Agua y Suelo del CENID-RASPA INIFAP por el uso de su equipo e instalaciones para la obtención de datos de campo.

Referencias Bibliográficas

- Alfieri, J. G., Anderson, M. G., Kustas, W. P., & Cammalleri, C. (2017). Effect of the revisit interval and temporal upscaling methods on the accuracy of remotely sensed evapotranspiration estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 83–98.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO Riego y Drenaje Manual 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia.
- Argolo, dS. R., Chartuni, M. E., Filgueiras, R., Fernandes-Filho, E. I., Barbosa da Silva, A. C., & Venancio, L. P. (2020). Actual Evapotranspiration and Biomass of Maize from a Red-Green-Near-Infrared (RGNIR) Sensor on Board an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Water*, 12(9), 2359.
- Arreola, J., Vega, C., Navarro, E., & Burciaga, G. (2016). Foraging potentials for hybrids of maize (*Zea mays* L.) in the Lagoon Region. *Agronomy Mesoamerican*, 7(2), 88-92.
- Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira-Sandoval, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. (2017). Land use classification from Sentinel-2 imagery. *Revista de Teledetección*, 48, 55-66.
- Calera, A., & González-Piqueras, J. (2007). *Parámetros biofísicos de la cubierta vegetal: relaciones operativas para obtención de mapas de estos parámetros desde las imágenes de satélite*. Ciudad Real, España: Grupo de Teledetección, Universidad Castilla la Mancha. Documento de PLEIADeS.
- Campos, I., Neale, C. M. U., Calera, A., Balbontín, C., & González-Piqueras, J. (2010). Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management*, 98(1), 45-54.
- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sensing*, 7(4), 4026-4047.
- Choudhury, B. J., Ahmed, N. U., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Daughtry, C. S. T. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 50(1), 1-17.

- Escarabajal-Henarejos, D., Molina-Martínez, J. M., Fernández-Pacheco, D. G., Cavas-Martínez, F., & García-Mateos, G. (2015). Digital photography applied to irrigation management of Little Gem lettuce. *Agricultural Water Management*, 151, 148-157.
- Gao, Y., Duan, A., Sun, J., Li, F., Liu, Z., Liu, H., & Liu, Z. (2009). Crop coefficient and water-use efficiency of winter wheat/spring maize strip intercropping. *Field Crops Research*, 111(1–2), 65-73.
- González, C. F., Peña, R. A., Núñez, H. G., & Jiménez, G. C. A. (2005). Efecto de la densidad y altura de corte en el rendimiento y calidad del forraje de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(4), 393-397.
- González-Dugo, M. P., Neale, C. M. U., Mateos, L., Kustas, W. P., Prueger, J. H., Anderson, M. C., & Li, F. (2009). A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(11), 1843-1853.
- González-Piqueras, J., Rubio, E., Calera, A., Cuesta, G. A., Moratalla, A., & Gilabert, M. A. (2005). Seguimiento de la evapotranspiración mediante los coeficientes de cultivo desde teledetección. Aplicación a maíz y trigo. XI Congreso Nacional de Teledetección, septiembre 2005. (pp. 81-84).
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.
- Knipper, K. R., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Alfieri, J. G., Prueger, J. H., Hain, C. R., Gao, F., Yang, Y., McKee, L. G., Nieto, H., Hipps, L. E., Alsina, M. M., & Sánchez, L. (2019). Evapotranspiration estimates derived using thermal-based satellite remote sensing and data fusion for irrigation management in California vineyards. *Irrigation Science*, 37, 431–449.
- Mhaweji, M., Nasrallah, A., Abunnasr, Y., Fadel, A., & Faour, G. (2021). Better irrigation management using the satellite-based adjusted single crop coefficient (aKc) for over sixty crop types in California, USA. *Agricultural Water Management*, 256.
- Neale, C. M. U., Bausch, W. C., & Heermann, D. F. (1989). Development of Reflectance-Based Crop Coefficients for Corn. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASAE)*, 32(6), 1891-1900.
- Núñez, H. G., Contreras, G. E. F., & Faz, C. R. (2003). Características agronómicas y químicas importantes en híbridos de maíz para forraje con alto valor energético. *Técnica Pecuaria en México*, 41(1), 37-48.
- Ojeda, B. W., Sifuentes, I. E., & Unland, W. H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40(1), 13-25.
- QGIS; Version 3.10.6 LTR (Long Term Release). 2020. Software For Geographic Information System, Open Source Geospatial Foundation: Chicago, IL, USA.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 119-126.
- 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.
- Reyes, G. A., Zavala, B. F., Álvarez, R. V. dP., Cano, R. P., & Rodríguez, M. V. M. (2022). Efecto de la tasa de evapotranspiración en área foliar, potencial hídrico y rendimiento de maíz forrajero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3), 407-420.

- Rouse, J. W., Haas, R. W., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. Journal NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD. 371 p.
- Rukhovich, D. I., Rukhovich, A. D., Rukhovich, D. D., Simakova, M. S., Kulyanitsa, A. L., Bryzhev, A. V., & Koroleva, P. V. (2016). Maps of averaged spectral deviations from soil lines and their comparison with traditional soil maps. Eurasian Soil Science, 49, 739–756.
- Wright, J. L. (1982). New evapotranspiration crop coefficients. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division. 108(IR2):57-74.