



**Sexto**  
**Congreso Nacional de**  
**Riego, Drenaje y Biosistemas**  
COMIIB- 2021 / Hermosillo, Sonora



**Artículo: COMIIB-21004**

*Hermosillo, Son., del 9 al 11 de junio de 2021*

## **ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO BASADO EN LA METODOLOGÍA COBERTURA VEGETAL-ÍNDICES DE VEGETACIÓN**

**Mariana de Jesús Marcial Pablo<sup>1\*</sup>; Ronald Ernesto Ontiveros Capurata<sup>2</sup>; Sergio Iván Jiménez Jiménez<sup>1\*</sup>; Ernesto Sifuentes Ibarra<sup>3</sup>; Waldo Ojeda Bustamante<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA)-INIFAP, Km. 6.5 Margen Derecha del Canal Sacramento, Gómez Palacio, C.P. 35079, Durango, México.

<sup>2</sup>CONACYT- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Jiutepec, C.P. 62550, Morelos, México.

<sup>3</sup>Campo Experimental Valle del Fuerte-INIFAP. Carretera México-Nogales Km. 1609, Juan José Ríos, C.P. 81110, Sinaloa, México.

<sup>4</sup>Programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, C.P. 56230, Texcoco, México.

[marcial.marianadejesus@inifap.gob.mx](mailto:marcial.marianadejesus@inifap.gob.mx) – 7772664423

### **Resumen**

Una de las variables importantes dentro de la agricultura de precisión es estimar el requerimiento hídrico de los cultivos, que se define como la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>). El ET<sub>c</sub> se obtiene como producto de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y el coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>). Existen numerosas metodologías que incluyen datos de sensores remotos para estimar y obtener información del K<sub>c</sub>. El trabajo tiene como finalidad presentar una metodología para estimar los coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>) en función de la cobertura vegetal (CV) y del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) obtenida de imágenes multispectrales de alta resolución espacial para una densidad de siembra de 80,000 plantas/ha. Los valores de K<sub>c</sub> se obtuvieron a partir del coeficiente de cultivo basal (k<sub>cb</sub>) y coeficiente de estrés hídrico del suelo (K<sub>s</sub>), el valor K<sub>cb</sub> se estimó a partir de datos experimentales basado en el concepto días grado crecimiento acumulados (GDD). Para calcular los valores de la CV y del NDVI de los píxeles con cultivo, se empleó método de análisis de imágenes basado en objetos OBIA (Object Based Image Analysis). El modelo K<sub>ccv-NDVI</sub> mostró un alta correlación lineal (R<sup>2</sup>=0.94) con un RMSE=0.055; con este modelo de K<sub>c</sub> se obtiene la variabilidad espacial y temporal de los requerimientos de riego.

**Palabras claves:** Coeficiente de cultivo, cobertura vegetal, NDVI.



## 1. Introducción

Un aspecto importante para la gestión eficiente del riego se basa en la disponibilidad oportuna de información precisa sobre los requerimientos agua de los cultivos, que puede estar representada por la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>). El modelo FAO-56 es el método más utilizado para la estimación del ET<sub>c</sub> (Pereira et al., 2015), que requiere del conocimiento del coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) y la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>).

El otro componente principal del método FAO56 es el K<sub>c</sub> que representa las diferencias físicas y fisiológicas entre un cultivo específico y el cultivo de referencia; el K<sub>c</sub> puede seguir un enfoque único o dual.

Las características del cultivo a lo largo de las etapas de crecimiento cambian, lo que afecta los valores de K<sub>c</sub> a lo largo del ciclo del cultivo. Por lo tanto, el K<sub>c</sub> se encuentra en función del tipo de cultivo y variedad, fenología, densidad de plantas, contenido de nutrientes, clima, contenido de agua del suelo, métodos de riego e integrando procesos del suelo, biofísicos, fisiológicos y aerodinámicos (Allen et al., 2006).

Durante las últimas tres décadas se han desarrollado varios enfoques que incluyen datos de sensores remotos para estimar y obtener información distribuida espacialmente del K<sub>c</sub>, K<sub>cb</sub> y evapotranspiración en apoyo a la gestión del riego (Er-Raki et al., 2007; González-Dugo et al., 2013). Los datos de los sensores remotos se obtienen en forma de índices de vegetación (IVs), es decir, combinaciones matemáticas de dos o más bandas espectrales del espectro electromagnético.

Los datos espectrales utilizados en el cálculo de los IVs se pueden obtener de diferentes plataformas de adquisición de datos, incluidos dispositivos espaciales (sensores satelitales), aerotransportados o terrestres. Existen un gran conjunto de misiones satelitales, que proporcionan una cobertura espectral sinóptica y repetitiva de la superficie de la Tierra con resoluciones espaciales y temporales mejoradas, lo que hace posible el seguimiento oportuno del crecimiento real de los cultivos a nivel de campo. Además, los avances tecnológicos y la reducción de costos asociados a los vehículos aéreos no tripulados (UAV) y a los dispositivos portátiles (espectroradiómetro portátiles), junto con el aumento de la potencia computacional, han creado nuevas oportunidades para el seguimiento de la dinámica de crecimiento de los cultivos (Gago et al. al., 2015).

La cobertura vegetación (CV) se ha utilizado para estudiar el estado fenológico y fisiológico de la vegetación, monitorear las etapas de desarrollo del cultivo y estimar los rendimientos de los cultivos. Debido a que los IVs y CV están correlacionados con la fenología del cultivo y la densidad del dosel del cultivo, es necesario estudiar su correlación con K<sub>c</sub>. Considerando lo anterior la finalidad del estudio estimar los valores del coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) en base a la cobertura vegetal (CV) y al índice de vegetación (IV) durante el desarrollo de un cultivo.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Coeficiente de cultivo Kc

Para usar el método de cálculo de ET de referencia para estimar la ET de un cultivo, la proporción de una superficie cultivada y de referencia se combina en un coeficiente de cultivo de acuerdo con:

$$ET_c = E_{Tr} \times K_c \quad (1)$$

El efecto del microclima sobre la ET<sub>c</sub> es descrito por E<sub>Tr</sub> y las propiedades del cultivo que afectan la ET son cuantificadas por K<sub>c</sub> (Allen et al., 2006). Este método se puede utilizar para calcular la ET<sub>c</sub> en condiciones "estándar" (es decir, sin estrés), pero no puede estimar directamente la ET<sub>c</sub> con estrés hídrico. Allen et al. (2006) separaron el K<sub>c</sub> en componentes de evaporación y transpiración de la planta, además se incluyó un coeficiente de estrés hídrico (K<sub>s</sub>) para las condiciones limitantes de agua en el suelo:

$$ET_c = (K_{cb} \times K_s + K_e) \times E_{Tr} \quad (2)$$

En condiciones de estrés hídrico y sin tener en cuenta la evaporación del agua del suelo, el coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) se puede estimar utilizando la siguiente expresión:

$$K_c = K_{cb} \times K_s \quad (3)$$

K<sub>cb</sub> es el coeficiente basal de cultivo obtenido en condiciones óptimas de desarrollo del cultivo; K<sub>cb</sub> puede estimarse utilizando la metodología basado en grados día de crecimiento acumulados (GDD) propuesta por Ojeda-Bustamante et al. (2004):

$$K_{cb} = K_{max} \operatorname{erfc} \left( \left( \frac{x_i - x_{K_{max}}}{\alpha_1} \right)^2 \right); \text{ si } K_c < K_{c_0}, K_c = K_{c_0} \quad (4)$$

Dónde: K<sub>max</sub> es el valor máximo del coeficiente de cultivo basal (K<sub>cb</sub>) durante el periodo de crecimiento; K<sub>c0</sub> es el coeficiente basal del cultivo para la primera etapa fenológica que depende esencialmente de la evaporación del suelo; erfc representa la función error complemento;  $x_i$  expresa los días grado crecimiento acumulado (GDD) hasta el día i, a partir de la siembra o de la emergencia del cultivo, normalizado con respecto al valor de GDD requerido para completar el ciclo fenológico del cultivo;  $x_{K_{max}}$  es el valor adimensional normalizado  $x$  cuando se presenta el valor máximo K<sub>max</sub>;  $\alpha_1$  es el coeficiente de regresión que se obtiene del ajuste entre los datos experimentales y el modelo.

K<sub>s</sub> representa la fracción de la tasa de transpiración potencial que está experimentando un cultivo, puede calcularse con el método de agotamiento del agua del suelo de la FAO-56 o mediante una función del agua disponible en el suelo con la metodología utilizada por Jensen et al. (1970).

## 2.2. Componentes de la cobertura vegetal e índices de vegetación

El procedimiento anterior para estimar el  $K_c$  se ve limitada si se desea representar la variabilidad espacial de esta variable. En este contexto los sensores remotos son una herramienta útil para obtener un coeficiente de cultivo basado en la reflectancia. Los índices de vegetación calculados a partir de imágenes multiespectrales permite la estimación de la  $ET_c$  y  $K_c$  en una escala de píxeles, donde cada píxel representa un único sistema de suelo-vegetación (Chen et al., 2005).

Los métodos de  $K_c$  y  $K_{cb}$  basados en la reflectancia (Neale et al. ,1989; Bausch, 1993) se han utilizado para mejorar la programación del riego del maíz. Estos métodos se basan en datos de detección remota para calcular un índice de vegetación (IV), mediante una relación lineal entre el índice de vegetación y el coeficiente de cultivo. Uno de los índices de vegetación más utilizados es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (5)$$

La cobertura vegetal (CV) es un parámetro de gran importancia en el seguimiento de los cultivos; está relacionado directamente con el crecimiento del cultivo y la evapotranspiración, debido a que la evolución de la cobertura vegetal indica las fases de la evaluación del coeficiente de cultivo (Calera, 2005). La CV se determinó con el método de análisis de imágenes basado en objetos OBIA (Object-based image analysis) en el software eCognition developer 9.0 (Trimble GeoSpatial). El procedimiento OBIA permite la combinación de información espectral, contextual y morfológica, entre otras características de los objetos creados mediante la segmentación de las imágenes. Las dos etapas del enfoque OBIA son la segmentación y la clasificación de la imagen. La metodología empleada fue la descrita por Marcial- Pablo et al. (2019) adaptando la clasificación en tres clases: vegetación, suelo y sombra. Los valores de NDVI se obtuvieron en los píxeles de la clase vegetación.

La interceptación de la luz del dosel es un factor principal de  $ET_c$  y de  $K_c$ . La fracción de la cobertura vegetal (CV) es una propiedad que se mide fácilmente y es un buen indicador de la interceptación de la luz, por lo tanto, la estimación precisa y eficiente de la CV real podría permitir una mejor programación y asignación del agua de riego (Bausch, 1995).

Los valores altos de IV indican áreas del cultivo en condiciones óptimas, asumiendo lo anterior se considera que el modelo  $K_c$  en función del IV y CV, es mejor que el modelo simple de  $K_c$  que se encuentra en función únicamente de IV y que es utilizado en la mayoría de los estudios. Pôças et al. (2015) estimaron de manera directa  $K_{cb}$  utilizando ecuaciones sofisticadas en función de CV y de IVs.

### 2.3. Caso de estudio

El estudio se realizó en el cultivo de maíz sembrados en 6 lotes de 6 m x 25 m con una separación entre surcos de 0.8 m y una densidad de 80,000 mil plantas/ha. La duración del ciclo fenológico del cultivo fue de 119 días equivalentes a 1655 GDD.

El índice de vegetación (IV) se obtuvo de las imágenes multiespectral adquiridas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV) o dron en seis fechas durante el desarrollo del cultivo, además de imágenes RGB para la determinación de la cobertura vegetal (CV). Los sensores empleados fueron una cámara Multispectral Tetracam ADC Snap y una Sony  $\alpha$  5100.

## 3. Resultados y Discusión

### 3.1. Curva de coeficiente de cultivo ( $K_c$ )

El ciclo fenológico del cultivo de maíz fue de 119 días (de la siembra a madurez fisiológica). El valor de  $K_{max}$  obtenido es de 1.10 para una densidad de 80,000 plantas/ha; la emergencia se presenta a 300 GDD ( $K_c \sim 0.15$ ), de la 4 a la enésima hoja entre los 300 a 900 GDD ( $K_c \sim 0.15 - 1.00$ ), la floración entre los 900 a 1100 GDD ( $K_c \sim 1.00 - 1.10$ ), de grano acuoso a abollado entre los 1100 a 1600 GDD (con un  $K_c \sim 1.10 - 0.4$ ) y la madurez fisiológica de 1600 a 1655 GDD ( $K_c \sim 0.3$ ).

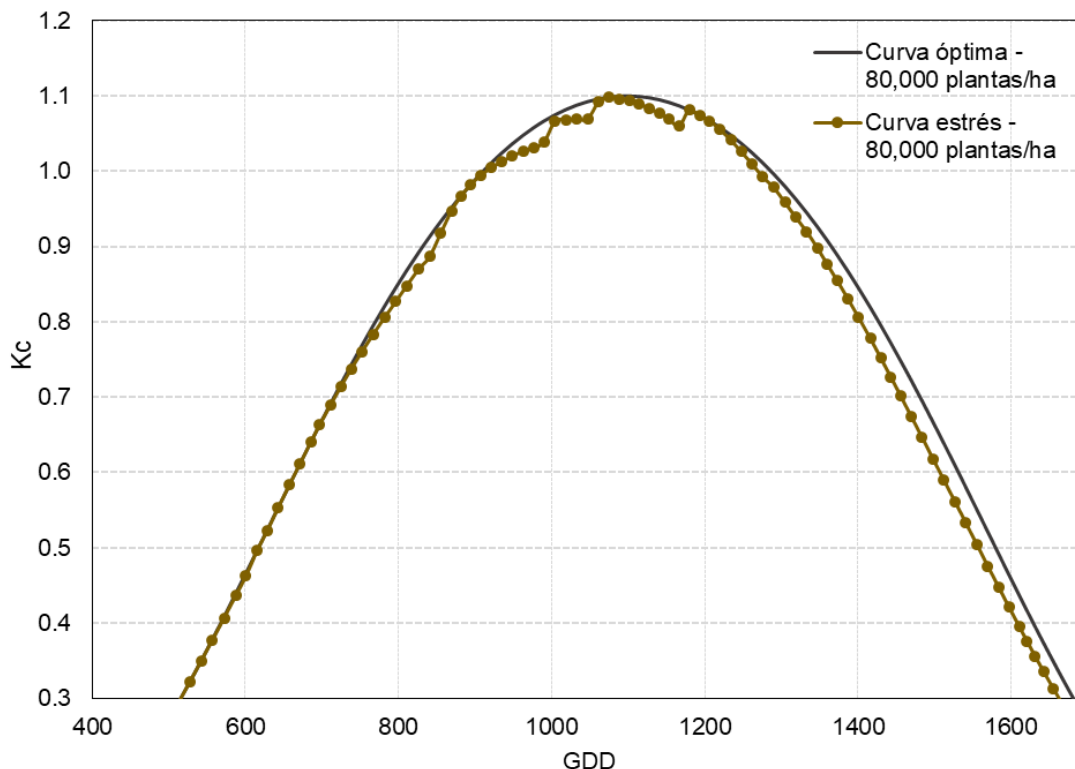


Figura 1. Curva de Kc del maíz para condiciones óptimas y con estrés

### 3.2. Relación índice de vegetación y cobertura vegetal con GDD

El NDVI han sido utilizados ampliamente en el seguimiento fenológico de cultivo de maíz (Calera et al., 2004; You et al., 2013). En la figura 2 se muestra la curva de desarrollo de los valores de NDVI y CV para los GDD obtenidos. El valor promedio de NDVI al término de la formación de hojas es de 0.59, alcanzando el valor máximo de 0.76 durante la floración y descendiendo hasta 0.31 en la formación y llenado de granos, con una desviación estándar promedio que va desde 0.01 a 0.03 con mayor variabilidad en las etapas de maduración debido principalmente al cambio en las características espectrales a medida que la planta reduce su humedad, lo que coincide con lo reportado por Xin et al. (2002). El porcentaje de cobertura vegetal máxima obtenida fue de 92%.

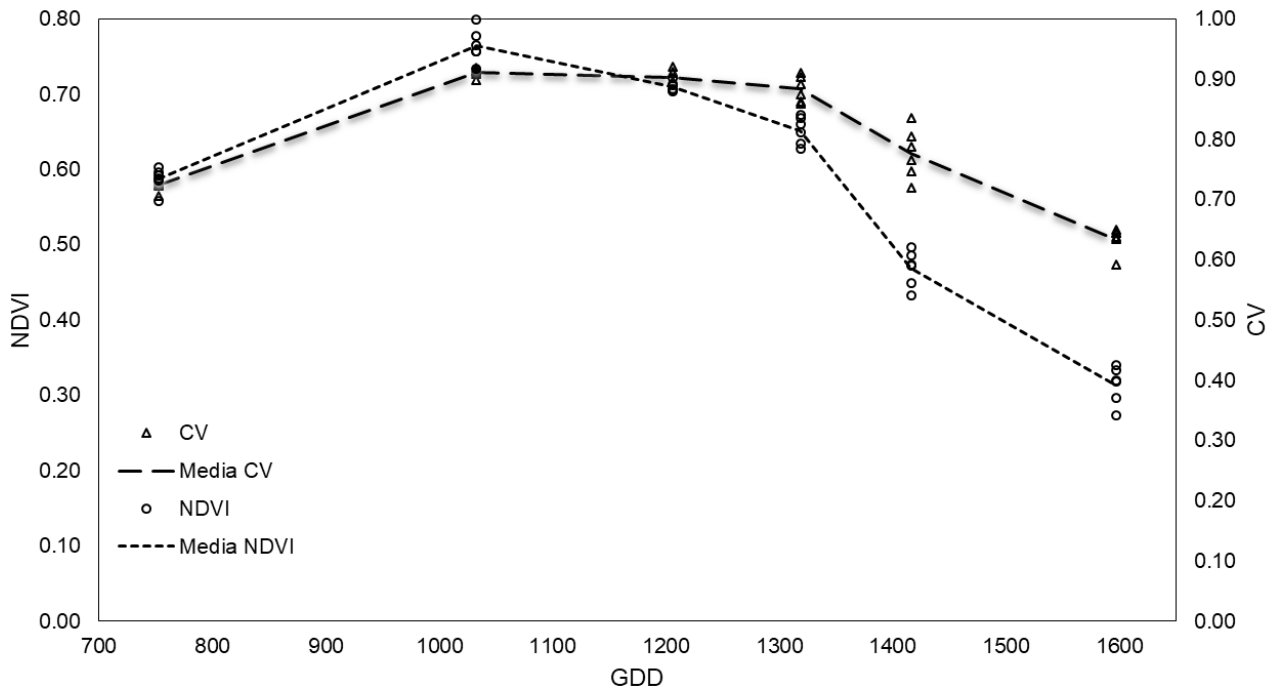


Figura 2. Valores de NDVI y CV obtenidos durante el desarrollo del cultivo

### 3.3. Modelo CV:NDVI

En la figura 3 se observa una fuerte correlación lineal entre los valores de  $K_{CGDD}$  y CV-NDVI con un  $R^2$  de 0.94; si los valores de  $K_{CGDD}$  se relacionarán solo con el NDVI el coeficiente  $R^2$  disminuye a 0.92. Los resultados indican que el modelo  $K_{CCV-NDVI}$  presenta un cuadrado medio del error (CME) de 0.003, la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 0.055 y una eficiencia (E) de 0.96. Es necesario resaltar que cuando la vegetación se aísla del suelo o de otro tipo de cubierta, NDVI puede superar los problemas de alta densidad de copa y producir mejores resultados.

Estos resultados son prometedores, trabajos similares han reportado valores más bajos de  $R^2$  con imágenes satelitales; Kamble et al. (2013) estimaron los valores de  $K_c$  de los datos de las imágenes MODIS utilizando un modelo de regresión lineal simple  $K_{cNDVI}$  con un  $R^2$  de 0.83.

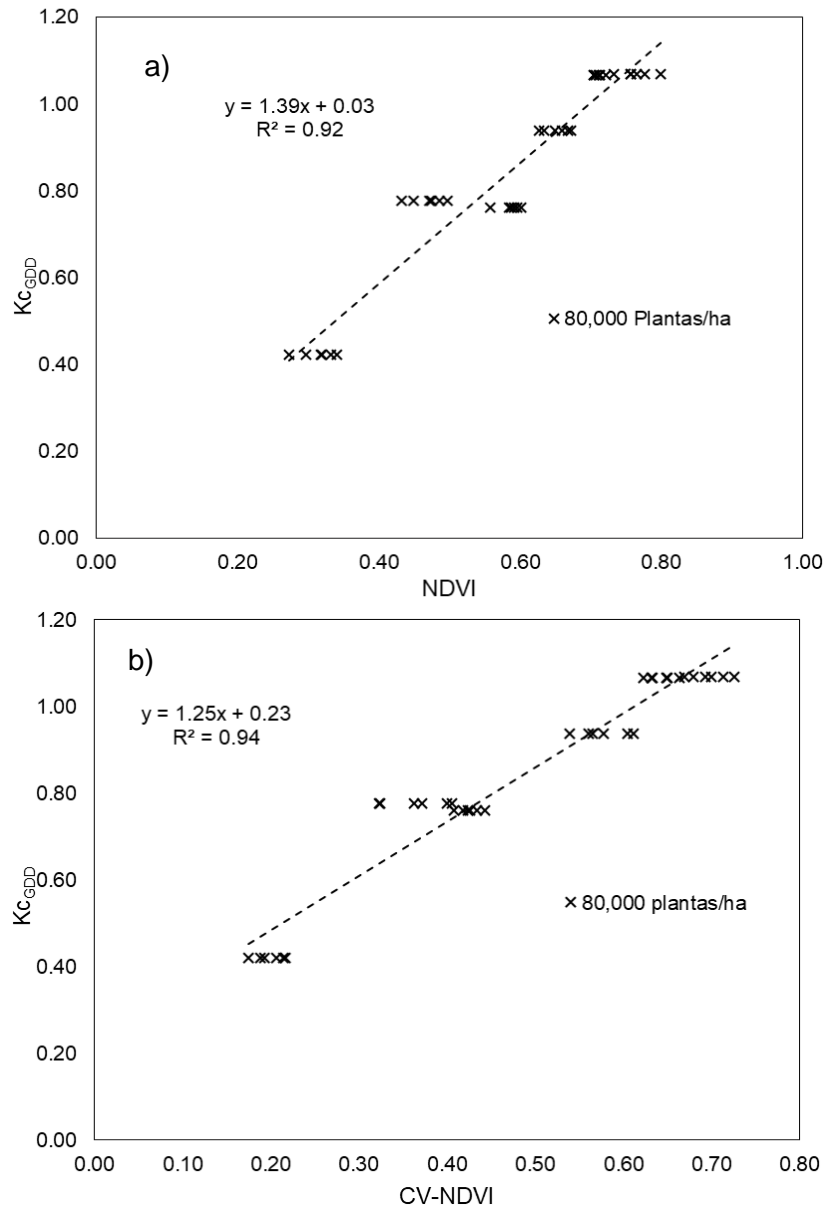


Figura 3. Regresión lineal entre valores  $K_c$  obtenido con GDD y a) NDVI, b) CV-NDVI

#### 4. Conclusiones

Con la falta de información en las grandes zonas de riego para poder obtener la demanda de agua, los modelos  $K_{cCV-NDVI}$  pueden ser una alternativa viable, este modelo pueden ser empleados en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo. El uso de modelos espectrales para la estimación de  $K_c$  basados en valores de reflectancia con alta resolución espacial y temporal, una vez validados localmente con datos experimentales,



ofrece una herramienta poderosa y simple para la estimación de ETc en la programación del riego en áreas agrícolas.

Con el modelo Kc en función del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y cobertura vegetal (CV) la precisión en la estimación de Kc aumenta ( $R^2=0.94$ ).

## 5. Referencias Bibliográficas

Allen R., Pereira L., Raes D., & Smith M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56.

Bausch, W. C. (1993). Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment*, 46(2), 213-222.

Calera, A. B. (2005). La evapotranspiración: concepto y metodología de cálculo. *Agua y Agronomía*. 1re edición. Editorial: Mudi-Prensa. Barcelona, España. 163-238.

Chen, J.M., Chen, X., Ju, W., & Geng, X. (2005). Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs. *Journal of Hydrology*, 305(1), 15–39.

Er-Raki, S., Chehbouni, A., Guemouria, N., Duchemin, B., Ezzahar, J., & Hadria, R. (2007). Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agricultural water management*, 87(1), 41-54.

Gago, J., Douthe, C., Coopman, R. E., Gallego, P. P., Ribas-Carbo, M., Flexas, J., Escalona, J. & Medrano, H. (2015). UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. *Agricultural water management*, 153, 9-19.

González-Dugo, M. P., Escuin, S., Cano, F., Cifuentes, V., Padilla, F. L. M., Tirado, J. L., Oyonarte, N., Fernández, P. & Mateos, L. (2013). Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. II. Application on basin scale. *Agricultural water management*, 125, 92-104.

Jensen, M.; Robb, C.N.; Franzoy, E. Scheduling irrigations using climate-crop-soil data. *J. Irrig. Drain. Div.* 1970, 96, 25–37.

Kamble, B., Kilic, A., & Hubbard, K. (2013). Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote sensing*, 5(4), 1588-1602.

Marcial-Pablo, M. D. J., Gonzalez-Sanchez, A., Jimenez-Jimenez, S. I., Ontiveros-Capurata, R. E., & Ojeda-Bustamante, W. (2019). Estimation of vegetation fraction using RGB and multispectral images from UAV. *International journal of remote sensing*, 40(2), 420-438.





Neale, C.M.U., Bausch, W.C., Heermann, D.F., 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. ASAE* 32, 1891–1899.

Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes, D. C. Slack, & M. Carrillo. (2004). Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*. 53: 251-261.

Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147 (2015), 4-20.