



Artículo: COMEII-16062

## II CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2016

Chapingo, Edo. de México, del 08 al 10 de septiembre

### USO DEL MODELO DE SIMULACIÓN FAO-AQUACROP PARA DETERMINAR EL PERÍODO ÓPTIMO DE SIEMBRA DE MAÍZ BAJO CONDICIONES DE TEMPORAL

**Beatriz Hernández Bautista<sup>1</sup>; Waldo Ojeda Bustamante<sup>2\*</sup>; Agustín Ruiz García<sup>1</sup>;  
Jorge Flores Velazquez<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 Carr.México-Texcoco. 56230. Chapingo, México.

<sup>2</sup>Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 62550 Jiutepec, Morelos, México. wojeda@tlaloc.imta.mx. (\*Autor para correspondencia).

#### Resumen

El cultivo de maíz se siembra en México principalmente bajo condiciones de temporal. Las proyecciones de cambio climático indican mayor variabilidad en la precipitación en la mayor parte del país, por lo que se requiere disponer de herramientas que permitan analizar la respuesta de los cultivos ante condiciones climáticas cambiantes, en particular la lluvia y la temperatura. El modelo computacional AquaCrop simula el crecimiento, la productividad y el uso de agua de un cultivo de acuerdo parámetros calibrados en campo e información del suelo, clima, y agua. El objetivo del presente estudio fue analizar el rendimiento de maíz de temporal con diferentes fechas de siembra bajo condiciones de temporal en Chapingo, México, utilizando el modelo de simulación AquaCrop. Se validó el modelo para la variedad de maíz H-52 considerando los parámetros conservativos calibrados a partir de datos experimentales. Se simularon 11 fechas de siembra anuales para 28 años, comparando los rendimientos obtenidos para cada fecha de siembra para finalmente determinar el periodo óptimo en que se obtienen los mayores rendimientos y beneficios para el agricultor. Los mejores rendimientos se obtuvieron en el periodo comprendido del día 124 al 154 del calendario juliano. Los resultados indican que el modelo AquaCrop es una excelente herramienta de planificación para determinar el periodo óptimo de siembra de acuerdo a la respuesta de los cultivos a condiciones climática contrastantes.

**Palabras clave:** Periodo de lluvia, fecha de siembra, rendimiento, maíz.



## Introducción

El maíz es el cultivo más importante de México debido a que es un producto básico en la dieta de su población. México es un país tradicionalmente agrícola que cuenta potencialmente con 30 millones de hectáreas con vocación agrícola, que constituye el 15 % de su superficie total (INEGI, 2009). Anualmente se cultivan en promedio, cerca de 20 millones de hectáreas que representa un promedio de 70 % de la superficie agrícola potencial, con un rango de variación anual de 60 % a 85 % de dicha superficie. La mayor parte de la agricultura se practica bajo condiciones de temporal, totalizando el 75% la superficie anualmente establecida. Siendo la siembra de maíz el principal cultivo en donde cerca del 85% de la superficie de labor se produce mayoritariamente bajo condiciones de temporal (Íñiguez-Covarrubias et al., 2014).

Por el carácter estacional y variabilidad de la precipitación en las principales zonas maiceras bajo agricultura de temporal, la fechas de inicio y término de la temporada de lluvia son de gran importancia para hacer coincidir el ciclo del cultivo con el mejor periodo de lluvias para alcanzar el mayor potencial productivo (Ati *et al.*, 2002).

La selección de la fecha de siembra es una de las variables de mayor impacto en la producción de maíz bajo temporal ya que define el momento de ocurrencia de etapas fenológicas críticas y, por lo tanto, las condiciones ambientales predominantes en ese momento. De esta manera, el rendimiento potencial y alcanzable del maíz está condicionado por la fecha de siembra, sobretodo bajo condiciones de temporal. Los métodos basados en lluvia son los principales métodos para estimar el periodo óptimo de siembras bajo agricultura de temporal. Una vez calibrados usando datos experimentales, los modelos de simulación constituyen una herramienta fundamental para entender el comportamiento de los sistemas de producción agrícola y pueden ser una alternativa para analizar con mayor confiabilidad la respuesta temporal de los cultivos para conocer el grado de acoplamiento de la lluvia recibida con las demandas hídricas del cultivo a lo largo de su desarrollo fenológico.

La división de Agua y Suelo de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) desarrolló el modelo AquaCrop que permite simular el rendimiento de cultivos herbáceos en respuesta al agua recibida. Este modelo es el resultado de múltiples investigaciones a nivel mundial y se han reportado experiencias de la adaptación y calibración exitosa en lugares con diferentes condiciones medio-ambientales y características propias de los cultivos (FAO, 2012).

La comparación del modelo AquaCrop con dos de los modelos más usados para simular el desarrollo y producción de cultivos, CropSyst y WOFOST, bajo diferentes regímenes de humedad fue realizada por Todorovic, et al. (2009), quienes reportaron que a pesar que el modelo AquaCrop requiere menos



parámetros, fue capaz de reproducir la biomasa y rendimiento a la cosecha de manera similar a los dos modelos más complejos.

El objetivo general del trabajo fue analizar el rendimiento histórico del maíz de temporal que permita definir el periodo óptimo de siembra en la región de Chapingo, México, utilizando el modelo de simulación AquaCrop.

## **Materiales y métodos**

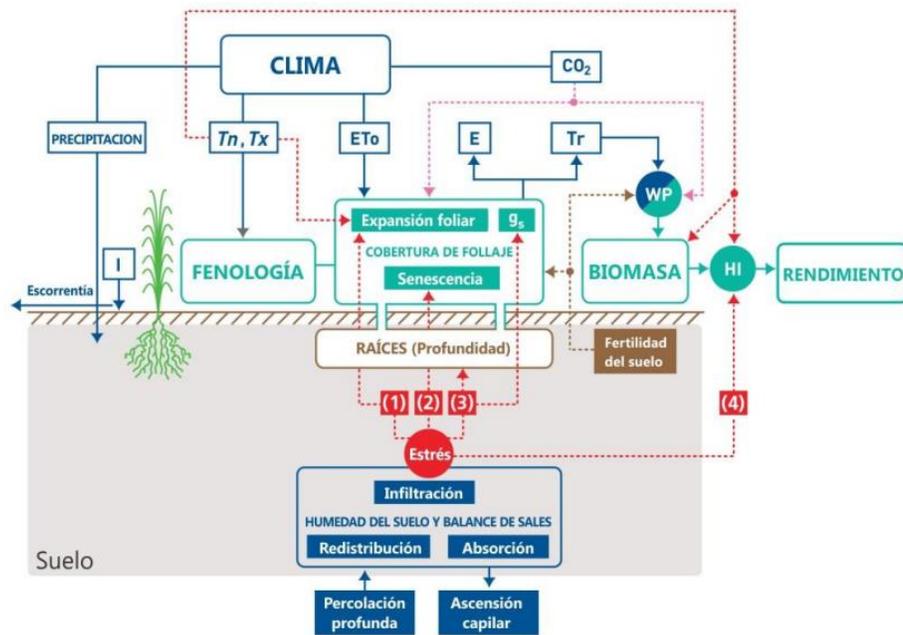
La base del trabajo fue el software AquaCrop. Éste modelo es sencillo en comparación con otros modelos de simulación biológica como DSSAT, CropSyst y WOFOST (Raes et al., 2009). El modelo AquaCrop requiere mucho menos parámetros de calibración y variables de entrada, tiene una interface computacional muy amigable, está ampliamente documentado, ha sido validado en una gran diversidad de cultivos en diferentes condiciones y localidades a nivel mundial. Flores-Gallardo (2013) validó el modelo en México bajo condiciones de riego en el estado de Sinaloa.

La respuesta del rendimiento al agua describe la relación entre el rendimiento de los cultivos y la escasez de agua como resultado de insuficiente suministro de agua por la lluvia o el riego durante el desarrollo del cultivo. El modelo AquaCrop se basa los trabajos de Doorenbos y Kassam (1979) publicado como manual FAO 33 de la serie de Riego y Drenaje, en donde se presenta una función de producción empírica que se utiliza para evaluar la respuesta de rendimiento al agua:

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right) = K_Y \left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right) \quad (1)$$

donde  $Y_x$  e  $Y$  son el rendimiento máximo y actual, respectivamente, expresado en ton/ha o kg/ha,  $(1-Y/Y_x)$  indica la disminución del rendimiento relativo,  $ET_x$  y  $ET$  indican la evapotranspiración máxima y la evapotranspiración real, respectivamente, expresado en mm por unidad de tiempo,  $(1-ET/ET_x)$  indica el estrés hídrico relativo y  $K_Y$  el factor de proporcionalidad entre la disminución del rendimiento relativo y la reducción relativa de la evapotranspiración. Existen documentados en la literatura los valores de  $K_Y$  por cultivo y etapa fenológica.

Las relaciones funcionales entre los diferentes componentes del modelo AquaCrop se representan en la Figura 1.



**Figura 1.** Representación funcional del modelo AquaCrop (Steduto et al., 2012).

Características particulares que distinguen AquaCrop de otros modelos de simulación de cultivos son:

- Se enfoca a la respuesta de los cultivos al agua.
- Usa el concepto de cubierta de follaje en lugar del índice de área foliar.
- El uso de la productividad del agua (WP) con valores normalizados para la demanda evaporativa atmosférica y la concentración de CO<sub>2</sub> le confieren al modelo una capacidad de extrapolación a diversos lugares, las estaciones y el clima, incluidos los futuros escenarios de proyección climática.
- Requiere un número relativamente bajo de parámetros.
- Requiere datos de entrada de variables explícitas que son su mayoría intuitivos.
- Tiene una interfaz de usuario bien desarrollada y amigable.
- Se ha aplicado para simular diversos sistemas agrícolas en todo el mundo.

Se utilizó la base de datos diarios registrados en el periodo 1981-2014 de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo (19°30' N, 98°51' O, 2241 msnm). Las variables consideradas fueron la temperatura mínima y máxima (°C), la humedad relativa mínima y máxima (%), la precipitación (mm), la velocidad de viento dominante (m/s), y las horas brillo sol.

Para calcular la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se utilizó el software de la FAO ET<sub>o</sub>-Calculator, que es un programa que utiliza la ecuación FAO Penman-Monteith siguiendo los procedimientos establecidos en el Manual 56 de la FAO para la conversión de variables y cálculo de datos de faltantes.



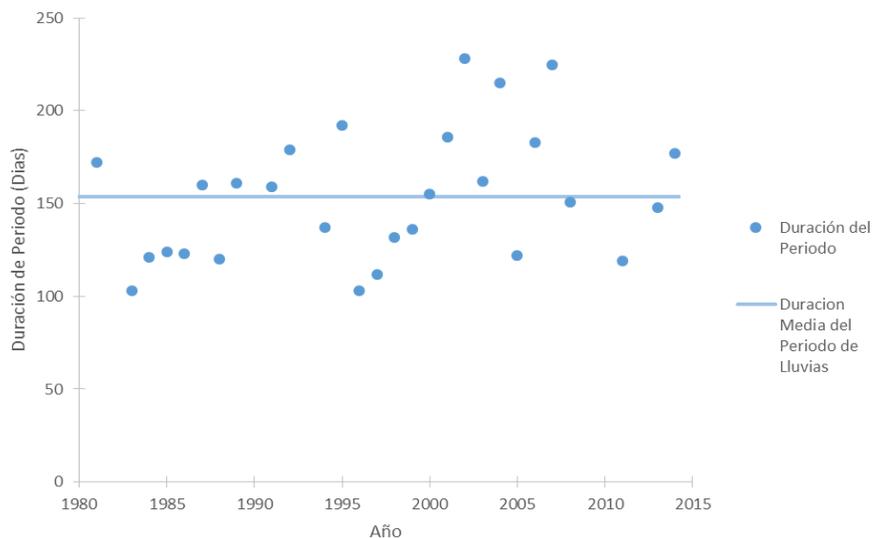
Se estimó el periodo de lluvias de acuerdo al método empírico ID4F15 descrito por Íñiguez-Covarrubias *et al.*, 2014).

Para validar el modelo se usó información publicada para la variedad de maíz H-52 liberada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en el año 2004, que es un híbrido con calidad nixtamalera, con características agronómicas sobresalientes como: rendimiento comercial superior al promedio, grano de color blanco cremoso, de ciclo intermedio-precoc, de 90 días a la floración y 170 días a la madurez, tolerante al acame, de porte intermedio (2.30 m), de hoja angulada y de espiga amarilla abundante (INIFAP, 2007; Ávila *et al.*, 2008).

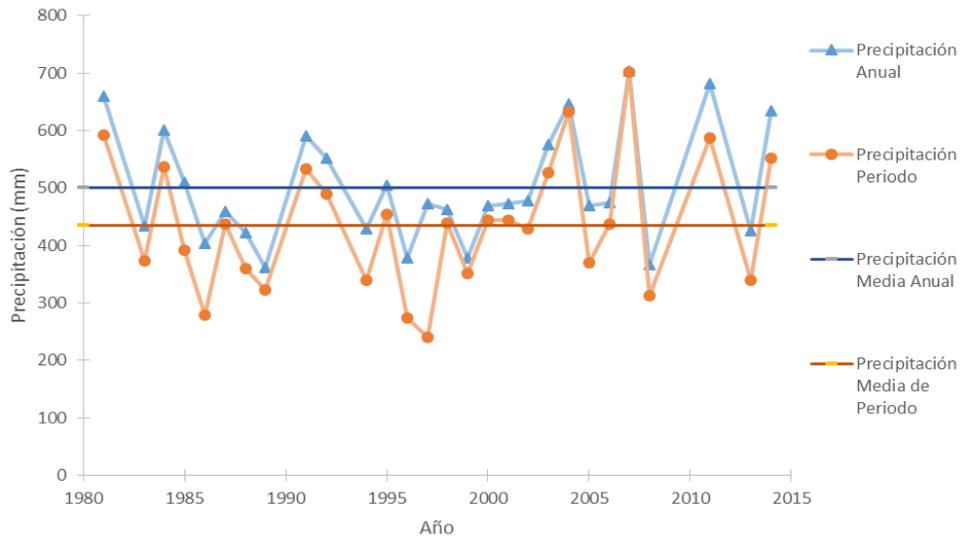
Para simular la respuesta del cultivo a diferentes fechas de siembra se seleccionaron 11 fechas (16-mar, 30-mar, 14-abr, 24-abr, 04-may, 14-may, 24-may, 03-jun, 13-jun, 28-jun y 13-jul). Se realizaron 11 simulaciones con el AquaCrop por año para el periodo 1981-2014 con datos completos que correspondieron a 28 años efectivos, resultado en 308 simulaciones.

### Análisis y discusión de resultados

Como referencia se estimó el periodo de la estación lluviosa usando métodos hidrológicos convencionales. La zona estudiada presenta alta variabilidad temporal de la lluvia. En la figura 2 se presenta la duración del periodo lluvioso usando el método ID4F15 descrito por Íñiguez-Covarrubias *et al.*, 2014) para la estación climatológica Chapingo. El promedio de la duración de los periodos de lluvia de los 28 años analizados fue de 154 días, con un valor máximo de 228 y un mínimo de 103. Para el caso de la lluvia acumulada en el periodo de lluvias, se calculó un valor promedio de 435 mm, con un máximo de 701 mm y un mínimo de 240 mm. La figura 3 presenta la precipitación anual y para el periodo lluvioso de los 28 años analizados.



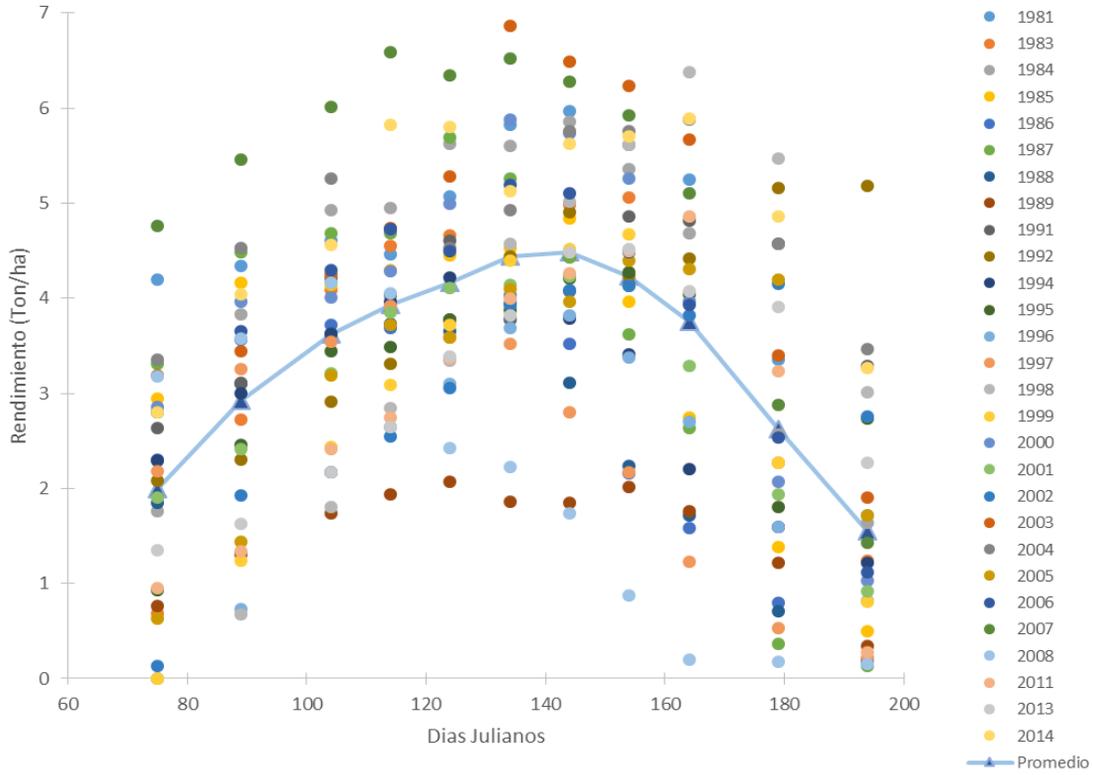
**Figura 2.** Duración de los periodos de lluvias en días.



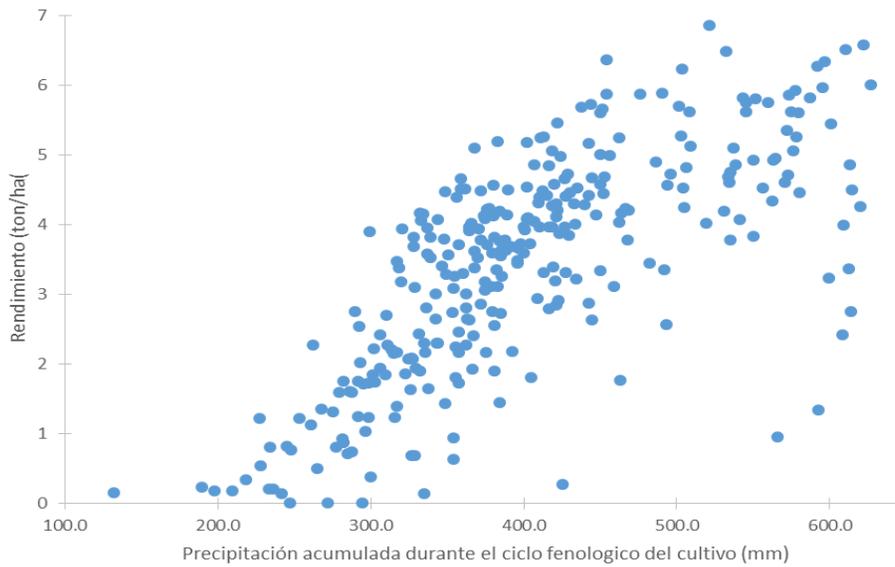
**Figura 3.** Precipitación acumulada, anual y en el periodo lluvioso

La Figura 4 presenta la variación de los rendimientos en función de la fecha de siembra para los años analizados. La fecha con los mayores rendimientos corresponde al 14 de mayo que corresponde al día juliano 134. El 96.4% de los rendimientos obtenidos en esta fecha son mayores a 3.5 ton/ha, y también es la fecha en la que se obtiene el mayor rendimiento de las 308 simulaciones.

La figura 5 presenta la variación del rendimiento en función de la lluvia acumulada en el periodo de lluvias. Se observa una gran variación del rendimiento a la lluvia acumulada en el ciclo de cultivo. Se observan tres zonas de interés de la lluvia acumulada en el ciclo fenológico. Lluvias menores de 200 mm indican siniestros completos, mientras que por arriba de 400 mm se pueden obtener rendimientos máximos si la lluvia se acopla a las necesidades hídricas del cultivo. La zona de 200-400 mm es la zona donde la lluvia limita en desarrollo de los cultivos y puede ser de alto riesgo para los productores.



**Figura 4.** Rendimientos simulados para los años estudiados considerando 11 fechas de siembra



**Figura 5.** Respuesta del cultivo, en ton/ha, a la lluvia recibida en el ciclo fenológico



## Conclusiones

Se estimó que el promedio durante el periodo de lluvias determinado con el método empírico ID4F15 es de 435 mm. El día promedio de inicio de la temporada de lluvias determinado por dicho método fue el 24 de mayo correspondiente al día 144 del calendario juliano y el fin de temporada el día 25 de octubre correspondiente al día 298 del calendario juliano. En promedio la duración de periodo de lluvias fue de 154 días.

Se analizó la aplicabilidad del modelo AquaCrop para estimar los rendimientos del maíz de temporal en la región de Chapingo, México, obteniendo un rendimiento medio de 3.4 toneladas por hectárea, con rendimientos máximos de hasta 6.8 ton/ha en condiciones óptimas de precipitación y manejo de cultivo.

De acuerdo a las simulaciones realizada usando el modelo AquaCrop, las fechas de siembra en que se obtiene mayor rendimiento es el periodo comprendido del 4 de mayo al 3 de junio, en estas fechas se obtienen rendimientos mayores a 4 ton/ha.

Los resultados indican que la aplicación de modelos de simulación de cultivos son herramientas de planeación más robustas que los modelos hidrológicos basados en lluvia observada, ya que permiten estimar con mayor confiabilidad el periodo óptimo de siembra al considerar la variación estacional de la lluvia y las necesidades hídricas de los cultivos.

## Referencias bibliográficas

- Ati, O.F.; Stigter, C.J. y Oladipo, E.O. 2002. A comparison of methods to determine the onset of the growing season in northern Nigeria. *Int. J. Climatol.* 22:731–742.
- Avila, P. M. A., Arellano, V. J. L., Virgen, V. J. & Gámez, V.A.J. 2008. H-52, híbrido de maíz para Valles Altos de la Mesa Central de México. 65 años de investigación científica en México. Día de Campo CEVAMEX 2008. Campo Experimental Valle de México. Centro de Investigación Regional del Centro. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chapingo, Estado de México. Memoria Técnica Núm. 9 (pp. 45-46).
- Doorenbos, J. y A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainager.* Paper 56. FAO, Italy.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP. 2007. Paquetes tecnológicos para maíz de temporal (Ciclo agrícola primavera-verano) para condiciones de alto, medio y bajo potencial productivo, (pp. 28-29). México, D.F.



- Íñiguez-Covarrubias, M. W. Ojeda-Bustamante, C. Díaz-Delgado, E. Sifuentes-Ibarra. 2014. Análisis de cuatro variables del período de lluvias asociadas al cultivo maíz de temporal (Analysis of four variables associated with rainy seasonal in maize cultivation). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5(1): 101-114
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2012. AquaCrop, modelo de la productividad del agua para cultivos. Consultado 01-06-2015 en [http://www.fao.org/nr/water/aquacrop\\_about.html](http://www.fao.org/nr/water/aquacrop_about.html)
- Flores-Gallardo, H., W. Ojeda-Bustamante, H. Flores-Magdaleno, E. Sifuentes-Ibarra, E. Mejía-Saénz. 2013. Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. *Agrociencia*. 47(4):347-359.
- INEGI. 2009. Censo Agropecuario 2007, VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Aguascalientes, México.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres, E. (2009). Aquacrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal* 101: 438-447.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. y Fereres, E. 2012. Crop yield response to water. *FAO irrigation and drainage paper* 66. Roma.
- Todorovic, M., R. Albrizio, L. Zivotic, M. A. Saab, C. Stöckle, and P. Steduto. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST Models in the Simulation of Sunflower Growth under Different Water Regimes. *Agronomy Journal*. 101:509-521.