

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EVALUACIÓN DEL MODELO CERES-MAIZE PARA SIMULAR EL  
DESARROLLO Y CRECIMIENTO DEL MAÍZ (*Zea mays* L.) VARIEDAD  
ASGROW 7573, BAJO DIFERENTES CONDICIONES HÍDRICAS

TESIS

Que presenta DREYLI MAYGUALIDA HIDALGO RAMOS

como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila

Junio de 2017

EVALUACIÓN DEL MODELO CERES-MAIZE PARA SIMULAR EL  
DESARROLLO Y CRECIMIENTO DEL MAÍZ (*Zea mays* L.) VARIEDAD  
ASGROW 7573, BAJO DIFERENTES CONDICIONES HÍDRICAS

TESIS

Elaborada por DREYLI MAYGUALIDA HIDALGO RAMOS como requisito parcial  
para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE  
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN con la supervisión y aprobación del Comité de  
Asesoría



Dra. Diana Jasso Cantú  
Asesor Principal



M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos  
Asesor



Dr. Homero Ramírez Rodríguez  
Asesor



Dr. Raúl Rodríguez García  
Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel  
Subdirector de Postgrado  
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Junio 2017

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por darme salud y sabiduría.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por darme la oportunidad de formarme profesionalmente y cumplir una meta más en mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico durante mis estudios de postgrado.

A mi asesor principal el Dr. Raúl Rodríguez García por todo el apoyo que me brindó para la realización de esta investigación, a la Dra. Diana Jasso Cantú por todo el apoyo y consejos que me dió durante el tiempo que estuve trabajando en la investigación, al M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos y al Dr. Homero Ramírez Rodríguez, por todo el interés que mostraron para realizar este trabajo.

A los trabajadores de campo Lorenzo Villa Sandoval y a Juan José Valenzuela Cabrera, por haberme ayudado a sacar adelante el trabajo realizado en campo y laboratorio.

Al personal del Laboratorio de Fitoquímica, María Guadalupe Moreno Esquivel, María Leticia Rodríguez González y Olga Leticia Solís Hernández.

Al personal de laboratorio de aguas residuales, Biol. Silvia Guerrero Martínez y a la Lic. Ma. Del Socorro Mireles Vázquez por el apoyo en la realización de los análisis de suelo, así como a la T.L.Q. Josefina de la Cruz responsable del laboratorio de RASPA.

## DEDICATORIA

A mi padre (+)

**Marco Antonio Hidalgo Calderón**

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE CUADROS .....	viii
INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos .....	3
Hipótesis.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Modelos de simulación .....	4
Modelo.....	4
Tipos de modelos de simulación .....	5
Simulación .....	6
DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer).....	6
Datos requeridos por el modelo.....	9
a. Sitio .....	9
b. Clima.....	10
c. Suelo.....	10
d. Condiciones iniciales.....	10
e. Manejo del cultivo .....	10
Coeficientes genéticos.....	11
Maíz.....	12
Origen.....	12

El maíz en América.....	12
El maíz en México .....	12
Fenología.....	13
Crecimiento y Rendimiento del cultivo maíz .....	13
Rendimiento y estrés hídrico .....	14
CWSI (índice de estrés hídrico en el cultivo) .....	15
MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
Localización y descripción del experimento.....	16
Tratamientos evaluados y manejo del cultivo .....	16
Evaluación en campo .....	18
Estimación del CWSI durante el ciclo del cultivo maíz variedad Asgrow 7573 .....	21
Coeficientes genéticos.....	21
Simulación de materia seca total aérea.....	27
Simulación de índice de área foliar.....	29
CONCLUSIONES .....	35
REFERENCIAS .....	36

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Interfaz de inicio del modelo DSSAT v4.5.....	6
<b>Figura 2.</b> Descripción general de los componentes y estructura modular del DSSAT (Jones et al., 2003). .....	7
<b>Figura 3.</b> Diagrama de componentes de software de base de datos, aplicación y soporte y su uso con modelos de cultivo para aplicaciones en DSSAT (Jones et al., 2003).....	8
<b>Figura 4.</b> Evolución del CWSI durante el desarrollo del cultivo. Tratamiento 1 (T1); Tratamiento 2 (T2); Tratamiento 3 (T3); Tratamiento 4 (T4); Tratamiento 5 (T5). .....	22
<b>Figura 5.</b> Materia Seca Total aérea (MST) observado y simulado durante el ciclo del cultivo maíz Asgrow 7573. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e). .....	28
<b>Figura 6.</b> Índice de área foliar (IAF) observado y simulado durante el ciclo del cultivo maíz Asgrow 7573. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).....	30
.....	32
<b>Figura 7.</b> Materia Seca en Tallo, observado y simulado durante el ciclo del cultivo maíz Asgrow 7573. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).....	32
.....	34
<b>Figura 8.</b> Materia seca en hojas observado y simulado durante el ciclo del cultivo maíz Asgrow 7573. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).....	34

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Descripción de los coeficientes genéticos utilizados para la calibración de la variedad Asgrow 7573 en el modelo CERES – Maize (Esteves et al., 2012). .....	11
<b>Cuadro 2.</b> Etapas fenológicas del cultivo maíz.....	13
<b>Cuadro 3.</b> Valores de CWSI programados para efectuar los riegos en el cultivo de maíz variedad ASGROW 7573. ....	17
<b>Cuadro 4.</b> Propiedades físico-químicas del suelo requeridas por el modelo....	19
<b>Cuadro 5.</b> Datos climáticos mensuales durante el ciclo del cultivo, requeridos por el modelo CERES – Maize.....	20
<b>Cuadro 6.</b> Valores de los coeficientes genéticos para la variedad Asgrow 7573. .....	23
<b>Cuadro 7.</b> Desarrollo fenológico en días después de la siembra para los cinco tratamientos del cultivo maíz variedad Asgrow 7573. ....	24
<b>Cuadro 8.</b> Valores observados y simulados de los componentes de la cosecha para los cinco tratamientos del cultivo maíz. ....	26
<b>Cuadro 9.</b> Valores obtenidos de coeficiente de determinación ( $r^2$ ), índice de concordancia (d) y cuadrado medio del error (RMSE) para materia seca total aérea durante el desarrollo del cultivo. ....	27
<b>Cuadro 10.</b> Valores obtenidos de coeficiente de determinación ( $r^2$ ), índice de concordancia (d) y cuadrado medio del error (RMSE) para índice de área foliar durante el desarrollo del cultivo. ....	29
<b>Cuadro 11.</b> Valores obtenidos de coeficiente de determinación ( $r^2$ ), índice de concordancia (d) y cuadrado medio del error (RMSE) para materia seca de tallo durante el desarrollo del cultivo. ....	31
<b>Cuadro 12.</b> Valores obtenidos de coeficiente de determinación ( $r^2$ ), índice de concordancia (d) y cuadrado medio del error (RMSE) para materia seca de hoja durante el desarrollo del cultivo. ....	33



Resumen

EVALUACIÓN DEL MODELO CERES-MAIZE PARA SIMULAR EL  
DESARROLLO Y CRECIMIENTO DEL MAÍZ (*Zea mays* L.) VARIEDAD  
ASGROW 7573, BAJO DIFERENTES CONDICIONES HÍDRICAS

POR

DREYLI MAYGUALIDA HIDALGO RAMOS

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA DE SISTEMAS  
DE PRODUCCIÓN  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DRA. DIANA JASSO CANTÚ.- ASESOR

Saltillo, Coahuila

Junio 2017

El modelo CERES-MAIZE, simula en maíz (*Zea mays* L) el crecimiento, desarrollo y balance hídrico en el suelo en función de condiciones diferentes de manejo del cultivo y ambiente. Este modelo puede utilizarse como herramienta para apoyar las decisiones de planificación de actividades de investigación, la evaluación de estrategias productivas y los pronósticos del rendimiento del cultivo. El objetivo de esta investigación fue calibrar y validar el modelo CERES – Maize, del software DSSAT, para la variedad ASGROW 7573, para simular con alta confiabilidad el crecimiento y desarrollo de este cultivo bajo cinco regímenes de riego. El estudio se realizó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro de junio a octubre del 2016. El experimento se estableció con un diseño de bloques completamente al azar, cinco tratamientos de riego con cuatro repeticiones. Los coeficientes genéticos específicos que definen el desarrollo y crecimiento para esta variedad (P1, P2, P5, G2, G3 y PHINT), se obtuvieron para el tratamiento de manejo hídrico óptimo y se validaron. La evaluación del modelo mostró que simula bien los días a la emergencia, floración y madurez fisiológica, la diferencia porcentual con respecto a los valores observados estuvo dentro de un rango de (-7.3 % a 6.2 %), los coeficientes de correlación entre valores observados y medidos fueron elevados para la materia seca total aérea ( $r^2$  0.96 – 0.98), índice de área foliar ( $r^2$  0.93 – 0.98) y materia seca de tallo ( $r^2$  0.85 – 0.90), el modelo no tuvo la capacidad de simular los efectos del estrés hídrico en la etapa de llenado de grano, por tal razón sobrestimó el rendimiento de grano en los tratamientos que tuvieron mayor estrés hídrico en esta etapa. El modelo DSSAT tiene la capacidad de simular y validar de forma aceptable fenología, materia seca total e índice de área foliar para este sitio y en estas condiciones del cultivo.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE CERES-MAIZE MODEL TO SIMULATE THE  
DEVELOPMENT AND GROWTH OF CORN (*Zea mays* L.) VARIETY ASGROW  
7573, UNDER DIFFERENT WATER CONDITIONS

BY

DREYLI MAYGUALIDA HIDALGO RAMOS

MASTER OF SCIENCE IN ENGINEERING PRODUCTION SYSTEMS  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DRA. DIANA JASSO CANTÚ.- ADVISER

Saltillo, Coahuila

June 2017

The CERES-MAIZE model simulates maize (*Zea mays* L) growth, development and water balance in the soil as a function of different conditions of crop management and environment. This model can be used as a tool to support planning decisions for research activities, evaluation of productive strategies and crop yield forecasts. The objective of this research was to calibrate and validate the CERES - Maize model of the DSSAT software, for the variety ASGROW 7573 to simulate with high reliability the growth and development of this crop under five irrigation regimes. The study was conducted at the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro from June to October 2016. The experiment was established with a completely randomized block design, five irrigation treatments with four replicates. The specific genetic coefficients that define development and growth for this variety (P1, P2, P5, G2, G3 and PHINT) were obtained for the treatment of optimal water management and were validated. The evaluation of the model showed that it simulates the days to emergence, flowering and physiological maturity, the percentage difference with respect to the values observed was within a range of (-7.3% to 6.2%), correlation coefficients between observed values ( $r^2$  0.96 - 0.98), leaf area index ( $r^2$  0.93 - 0.98) and stem dry matter ( $r^2$  0.85 - 0.90), the model did not have the capacity to simulate the effects of Water stress in the stage of grain filling, for that reason overestimated the grain yield in the treatments that had greater water stress at this stage. The DSSAT model has the ability to simulate and validate acceptable phenology, total dry matter and leaf area index for this site and under these crop conditions.

## INTRODUCCIÓN

El uso de modelos de simulación mecanicistas de cultivos, son una alternativa mediante la cual es posible predecir con buen nivel de precisión el crecimiento y desarrollo de un cultivo al efectuar un cambio en uno o varios componentes del sistema agrícola (Rojas et al., 2011). Los experimentos de campo son laboriosos, costosos y requieren bastante tiempo, por lo cual los procesos de investigación se orientan a utilizar los modelos con la finalidad de ahorrar tiempo, analizar diferentes variables simultáneamente, lo cual no puede hacerse eficientemente con experimentos tradicionales (Román-Paoli et al., 2000). También pueden ser utilizados para la interpretación de resultados y el análisis del comportamiento de sistemas agronómicos en diversas condiciones ambientales y opciones de manejo (Soltani and Hoogenboom, 2007).

El modelo mecanicista CERES-Maize, forma parte del sistema computacional DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) (Hoogenboom et al. 2003), que simula desde la siembra hasta la madurez fisiológica a intervalo diario, el desarrollo fenológico, acumulación y partición de biomasa, crecimiento del índice de área foliar, raíz, tallo, hoja y grano, también el balance de agua y nitrógeno en planta y suelo, en respuesta a diferentes condiciones de suelo y clima y a condiciones de manejo del cultivo (variedades, riego, fertilización, densidad de población, fechas de siembra) (Quiring and Legates 20013, Sau et al., 2010). El modelo debe calibrarse en condiciones óptimas de disponibilidad de agua y nitrógeno, para lo cual es requerido obtener los coeficientes genéticos que definen las características de crecimiento y desarrollo de variedades que difieren en madurez (Bannayan and Hoogenboom, 2009) y posteriormente se validan en diferentes situaciones de manejo, clima y suelo (Chisnaga et al., 2015).

Entre los ejemplos de aplicación del modelo podemos citar a López et al., (2005) que probaron diferentes versiones del modelo en ambientes fríos en España, donde el agua y los nutrientes están totalmente disponibles la versión CERES-4.0 simuló más estrechamente la biomasa y el rendimiento de grano bajo estos ambientes fue debido a la nueva función de temperatura que influye en la

eficiencia de uso de la radiación y la tasa de llenado de grano. Chisanga et al. (2015) calibraron y validaron el modelo evaluando el efecto de fechas de siembra, fertilización nitrogenada y la disponibilidad de agua en el suelo, en el crecimiento y rendimiento del maíz en Zambia. También se utilizó para identificar las mejores prácticas de manejo de riego y fertilización nitrogenada para la producción de maíz dulce en suelos arenosos en Florida (He et al., 2012), así mismo para cuantificar el efecto en la producción de maíz de las condiciones climáticas extremas de altas temperaturas (ola de calor) y sequía, utilizando escenarios climáticos futuros en los Estados Unidos (Chung et al., 2014), también para evaluar la respuesta de cuatro híbridos de maíz de madurez diferente, en una región subtropical de Brasil (Soler et al., 2007),. Así como para determinar el efecto de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, en el rendimiento del maíz, en Indiana USA, (O'Neal et al., 2002), o evaluar durante dos años el efecto de diferentes regímenes de riego en el rendimiento de maíz en un ambiente semiárido mediterráneo (Nouna et al., 2000).

En el contexto de que los modelos de simulación pueden ser utilizados para predecir con buen nivel de precisión el crecimiento y desarrollo de un cultivo en situaciones diferentes de manejo, suelo y clima, con la finalidad de ahorrar tiempo en el proceso de investigación, fue que se estableció el objetivo de la presente investigación, que consistió en calibrar y validar el modelo CERES-Maíz de DSSAT para la variedad de maíz Asgrow-7573 bajo diferentes regímenes de riego. Esta variedad es utilizada en diferentes ambientes (Reyes et al., 2007) y en las condiciones climáticas de escasa precipitación de la región norte del país, el riego es prioritario para este cultivo para obtener altos rendimientos. La intención final es que el modelo se utilice en el futuro para evaluar otras prácticas de manejo y el comportamiento del cultivo en otras localidades.

## **Objetivo General**

Calibrar el modelo CERES – Maize del software DSSAT para la variedad ASGROW 7573 para simular el desarrollo y crecimiento del cultivo maíz bajo diferentes condiciones hídricas.

## **Objetivos Específicos**

- Evaluar la capacidad que tiene el modelo CERES – Maize para simular los componentes de cosecha, materia seca total, materia seca en tallo y materia seca en hoja.
- Evaluar la capacidad que tiene el modelo CERES – Maize para la simulación de la fenología del cultivo e índice de área foliar.
- Obtener la simulación del balance de agua en el suelo.

## **Hipótesis**

El modelo de simulación CERES – Maize permite predecir el crecimiento y rendimiento del cultivo Maíz bajo diferentes condiciones de manejo.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### **Modelos de simulación**

Un modelo de simulación es un programa que permite describir mediante fórmulas matemáticas diferentes procesos, mecanismos e interacciones que ocurren dentro de un sistema biológico, y que permite representar conceptualmente una simplificación del sistema de producción, como ejemplo un cultivo interactuando con las variables de clima, de suelo y las prácticas de manejo (Guevara, 2009). Son herramientas que integran información, y que permiten analizar y cuantificar las relaciones existentes entre los factores mencionados y sus efectos como componentes del sistema, permitiendo evaluar diferentes planteamientos productivos, o analizar un factor manteniendo los otros constantes, por ejemplo, la variación del rendimiento por efecto del clima sin modificar el manejo, el genotipo y el suelo (Salvagiotti et al., 2003).

El uso de modelos de simulación es una alternativa mediante la cual es posible predecir el comportamiento de un cultivo, ya que es posible predecir con buen nivel de precisión, el crecimiento y desarrollo de un cultivo al efectuar un cambio en uno o varios componentes del sistema (genotipos, ambientes, fecha de siembra, fecha de cosecha, densidad de siembra, fertilización, riegos, etc.). De esta forma, se puede agilizar el proceso de investigación, aunque se requiere de la validación de campo de los resultados simulados (Rojas et al., 2011).

El desarrollo y popularización de computadoras proporciona herramientas para almacenar grandes volúmenes de datos y realizar cálculos numerosos. Esto permite el desarrollo de sistemas computacionales para analizar el comportamiento y respuesta biológica de los sistemas de producción agrícola en escenarios de manejo diferentes y condiciones climáticas contrastantes (Flores et al., 2013).

### **Modelo**

Los modelos son especialmente importantes, porque ayudan a comprender el funcionamiento de los sistemas. El empleo de modelos facilita el estudio de los



sistemas, aun cuando estos puedan contener muchos componentes y mostrar numerosas interacciones como puede ocurrir si se trata de conjuntos bastante complejos y de gran tamaño (Hernández, 2009). Permiten cuantificar el grado de riesgo de la, o las estrategias, de producción elegidas, en un momento anterior a la implantación del cultivo, a través del análisis que combina la variabilidad genética y ambiental en una serie histórica de datos climáticos diarios (Guevara, 2009).

Los modelos de simulación basados en procesos se están utilizando cada vez más como un medio para simular los efectos a mediano y largo plazo de las prácticas de manejo agrícola (Liu, 2011).

La evaluación de un modelo de simulación de cultivos implica el establecimiento de la confianza en su capacidad para predecir los resultados con experiencia en el mundo real. Un método muy utilizado para la evaluación de los modelos consiste en comparar los valores observados con los resultados simulados en un diagrama de dispersión (Alagarswamy, 2000).

La modelización comenzó a tener importancia en agronomía y en otras áreas biológicas, dada su capacidad de suministrar información en un enfoque sistemático de todo el sistema biológico o, de una parte, como es el sistema de producción agrícola (Hernández, 2009).

### **Tipos de modelos de simulación**

Los modelos de simulación se dividen en icónicos que son una representación física a escala, los empíricos o correlativos, que describen las relaciones entre cultivo y ambiente sin referirse a un seguimiento biológico o físico que existe entre las variables gobernantes del crecimiento y desarrollo del cultivo, para este tipo de modelos la herramienta es la estadística, los analógicos que se basan en la analogía entre los sistemas, en tanto que los mecanicistas se basan en conocimientos detallados del funcionamiento del sistema (Rojas et al., 2011).

## Simulación

La simulación involucra el desarrollo de un modelo y su uso para caracterizar el sistema y sus interacciones con un mayor grado de detalle (Guevara, 2007).

## DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)

El modelo DSSAT es una colección de programas independientes que operan juntos. Bases de datos describen el clima, el suelo, las condiciones experimentales y mediciones, y la información de genotipo para la aplicación de los modelos para diferentes situaciones (Jones, 2003).

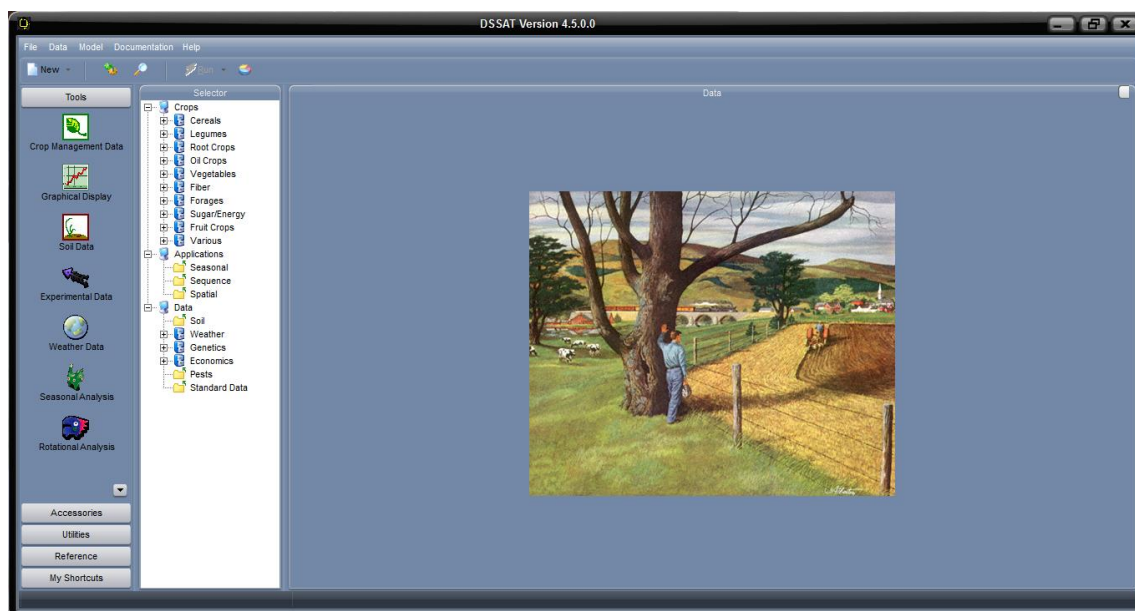


Figura 1. Interfaz de inicio del modelo DSSAT v4.5.

DSSAT es un sistema informático que incluye varios modelos de crecimiento de cultivos que son utilizados por muchos investigadores para las más variadas condiciones climáticas y del suelo y son una excelente opción para la obtención de información que ayuda en la planificación agrícola y la gestión (Dallacort et al., 2011). Permite organizar y manipular los datos, ejecutar modelos de cultivos, y analizar la salida. Puede simular 27 cultivos diferentes y, puesto que todos ellos comparten formatos de entrada y salida de datos comunes, el mismo clima y conjuntos de datos de suelo se pueden utilizar para simular todos los cultivos. El modelo DSSAT se ha empleado en una variedad de escalas y de aplicaciones

de investigación tales como la simulación de los efectos del cambio climático en la agricultura (Steven, 2008). Se ha utilizado en todo el mundo para evaluar el rendimiento de los cultivos en respuesta a los cambios en las prácticas agrícolas y condiciones ambientales (Negm et al., 2014).

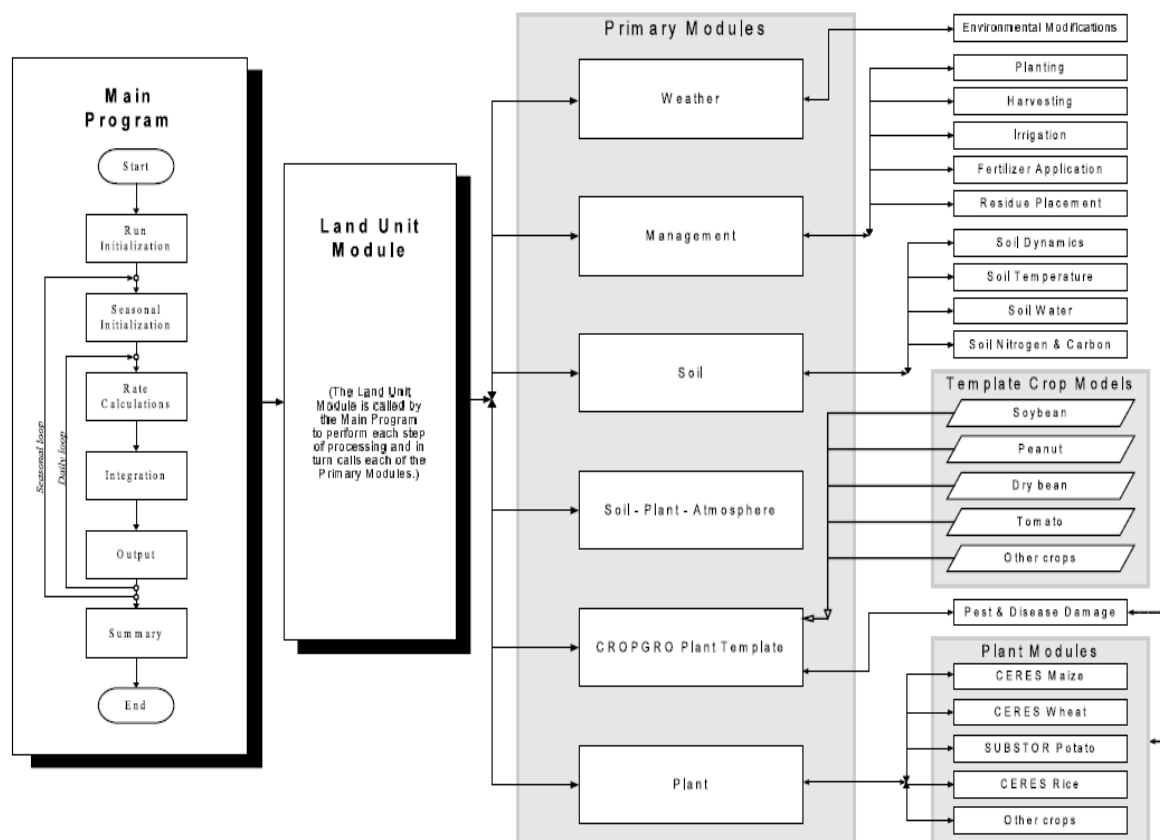


Figura 2. Descripción general de los componentes y estructura modular del DSSAT (Jones et al., 2003).

El modelo DSSAT ha sido ampliamente utilizado con éxito para la simulación de rendimiento de los cultivos bajo diferentes estrategias de gestión; para optimizar el uso de recursos; para la simulación de tendencia de rendimiento bajo diferentes escenarios de suelo y clima; y para el análisis de riesgos de los cultivos (Liu et al., 2011).

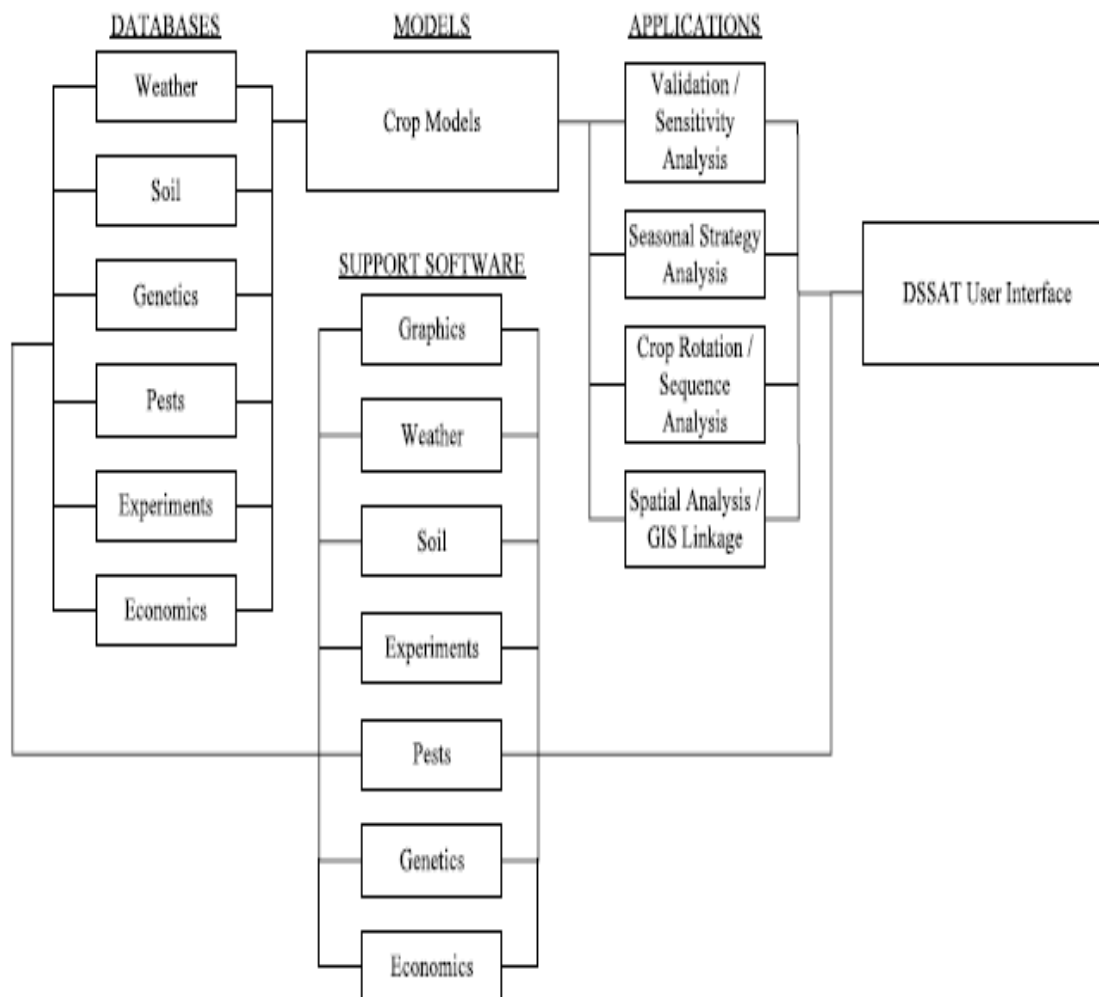


Figura 3. Diagrama de componentes de software de base de datos, aplicación y soporte y su uso con modelos de cultivo para aplicaciones en DSSAT (Jones et al., 2003).

### **CERES-Maize**

CERES-Maize (Crop Environmental RESOURCE Synthesis), es un módulo de DSSAT que fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), con extensas pruebas en la zona de maíz. Adaptaciones exitosas del modelo en áreas como Brasil, China y Nigeria han demostrado que el modelo es exacto en condiciones muy diferentes (O'Neal et al., 2002).

CERES-Maize es un modelo dinámico, con algunas partes mecanicistas y otras empíricas, que simula el desarrollo, el crecimiento y el rendimiento del maíz.

Durante el ciclo, el modelo calcula cada día, el avance de la fenología, la tasa de crecimiento y el reparto de la biomasa entre los órganos en fase de crecimiento. Cuando el agua y el nitrógeno no limitan el crecimiento (crecimiento potencial del cultivo), los procesos simulados se ven afectados por los valores que toman las principales variables ambientales (radiación solar, temperatura máxima y mínima diaria, y concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico), factores específicos del cultivar empleado (seis coeficientes genéticos) y las prácticas de cultivo (v.g. fecha de siembra, densidad de plantas y distancia entre líneas). Este modelo de cultivo, como todos los incluidos en el software del DSSAT, permite también simular el desarrollo y crecimiento del cultivo en entornos donde el agua y el nitrógeno son limitantes, cuando las opciones de balance de agua y nitrógeno están activadas. En estas circunstancias, el modelo realiza a diario un balance hídrico y de nitrógeno del cual deriva unos factores de déficit que permiten modular el crecimiento respecto del potencial (Sau et al.,2010).

CERES-Maize contabiliza los efectos del clima, tipo de suelo, el genotipo, los efectos del nitrógeno, y la gestión de las opciones sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo y se utiliza un intervalo de tiempo diario para calcular el crecimiento de los cultivos y para simular los balances de agua y nitrógeno (Steven, 2008).

### **Datos requeridos por el modelo**

El modelo requiere de datos mínimos para comenzar la operación de simulación del cultivo, es necesario proporcionar información del área de estudio, genotipo (coeficientes genéticos), características del suelo, base de datos del clima, manejo del cultivo (fecha de siembra, emergencia, floración, la densidad de población, fertilización, riego) (Jones et al., 2003).

### **Datos mínimos para la operación y evaluación del modelo DSSAT:**

#### **a. Sitio**

Latitud, longitud, elevación, temperatura media anual, pendiente, drenaje (tipo, espaciamiento y profundidad).

**b. Clima**

Datos diarios de radiación solar, temperaturas máximas y mínimas del aire, precipitaciones, velocidad del viento y humedad relativa.

**c. Suelo**

Clasificación del suelo (% de arena, limo y arcilla), capacidad de campo y punto de marchitez permanente, densidad aparente, carbono orgánico, pH, factor de crecimiento de las raíces, coeficiente de drenaje y conductividad eléctrica.

**d. Condiciones iniciales**

Cultivos previos (rotación de cultivos), raíces y nódulos; número y efectividad de rizobios (cultivos nodulados) humedad en el suelo y contenido de Nitrógeno en el suelo.

**e. Manejo del cultivo**

Nombre y tipo de cultivar, Fecha de siembra, profundidad y método de siembra, Espaciamiento entre surcos e hileras, dirección de filas, aplicaciones de fertilizantes orgánicos, fecha y cantidad por aplicación de fertilizantes inorgánicos, profundidad de incorporación, cantidad y concentraciones de nutrientes, laboreo.

**f. Datos para la evaluación del modelo**

Fecha de emergencia, fecha de floración o polinización, fecha de madurez fisiológica índice de área foliar, peso de materia seca total aérea, peso seco de hoja, peso seco de tallo, de tres etapas (mínimo) durante el ciclo de vida rendimiento de grano en términos de peso seco, peso seco de un grano, número de granos por planta, número de granos por metro cuadrado, mediciones de contenido de agua en el suelo en función del tiempo a intervalos de profundidad seleccionados y número de hojas producidas.

### Coeficientes genéticos

CERES-Maize determina el rendimiento utilizando seis coeficientes genéticos que difieren según la variedad. Para la simulación precisa del rendimiento se requieren los coeficientes genéticos correctos (Steven, 2008).

Cuadro 1. Descripción de los coeficientes genéticos utilizados para la calibración de la variedad Asgrow 7573 en el modelo CERES – Maize (Esteves et al., 2012).

Coeficiente genético	Descripción
P1	Período, en Td, desde emergencia de la semilla hasta el final de la etapa juvenil durante el cual la planta no responde a cambios en fotoperíodo.
P2	Período, en Td, durante la etapa juvenil en el cual la planta es sensible a cambios en fotoperíodo.
P5	Período, en Td, de llenado del grano desde fecha de floración femenina hasta fecha de madurez fisiológica.
G2	Número potencial de granos por mazorca por planta.
G3	Velocidad de llenado del grano durante la etapa lineal bajo óptimas condiciones (mg/día).
PHINT	"Phylochron interval"; intervalos, en unidades termales (Td), entre la aparición de cada hoja sucesiva.

\*Td= unidades térmicas.

Td se calcula diariamente utilizando las temperaturas diarias de la localidad que está siendo estudiada aplicando la siguiente ecuación:

$$Td = \sum_{i=0}^n \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - Tb$$

Donde:

Td = unidades térmicas

Tmax = temperatura máxima diaria, °C

Tmin = temperatura mínima diaria, °C

Tb = temperatura base, °C

n = número de días en el periodo

## **Maíz**

### **Origen**

La agricultura tradicional de maíz en Mesoamérica, todavía altamente biodiversa, se ve amenazada por varios factores: abandono de las milpas y migración, fragmentación de la tierra y reducción del área cultivada por productor, períodos de descanso cada vez más cortos con el correspondiente incremento en insumos químicos (Rodríguez, 2014).

Las prácticas agrícolas de la milpa conforman una compleja secuencia de técnicas productivas basadas en el conocimiento empírico tradicional, que actualmente se complementan con modernas innovaciones y técnicas agronómicas como el control de fertilidad y plagas por medio del uso de agroquímicos, usados por una regular proporción de milperos, dependiendo de sus recursos económicos o de su disponibilidad (Rodríguez, 2014).

### **El maíz en América**

El maíz es el cereal de los pueblos y culturas del continente americano. Las más antiguas civilizaciones de América. Desde los olmecas y teotihuacanos en Mesoamérica, hasta los incas y quechuas en la región andina de Sudamérica estuvieron acompañadas en su desarrollo por esta planta (Serratos, 2009).

El maíz ha sido y sigue siendo un factor de sobrevivencia para los campesinos e indígenas que habitan en la mayoría de los países del continente americano (Serratos, 2009).

### **El maíz en México**

En México el cultivo del maíz, alimento básico de sus habitantes, ocupa 70 % de las tierras cultivadas; sin embargo, aún no ha sido posible alcanzar la autosuficiencia en la producción, por lo que el país se ve obligado a importar grandes cantidades de grano para poder satisfacer la demanda alimenticia (Gutiérrez et al., 2002).



### Impacto económico

El maíz es el cereal que más importancia ha tenido en varios sectores de la economía a escala mundial durante el siglo XX y en los inicios del XXI. En los países industrializados, el maíz se utiliza principalmente como forraje, materia prima para la producción de alimentos procesados y recientemente para la producción de etanol (Serratos, 2009).

### Fenología

La progresión de etapas por las que atraviesa el cultivo se conoce como desarrollo.

#### Las etapas fenológicas del cultivo se muestran en el cuadro 2

Cuadro 2. Etapas fenológicas del cultivo maíz.

Etapas vegetativas	Etapas reproductivas
VE (Emergencia)	R1 (Emergencia de estigmas)
V1 (Primera hoja)	R2 (Cuaje o Ampolla)
V2 (Segunda hoja)	R3 (Grano lechoso)
Vn (Enésima hoja)	R4 (Grano pastoso)
VT (Panojamiento)	R5 (Grano duro o dentado)
	R6 (madurez fisiológica)

VT corresponde a la floración masculina; R1 corresponde a la floración femenina.

### Crecimiento y Rendimiento del cultivo maíz

El crecimiento del cultivo resulta de la acumulación de biomasa vegetal. Esa ganancia de peso se debe, principalmente, al balance neto positivo del intercambio de carbono entre la planta y su ambiente. En dicho balance, las pérdidas por respiración son sobrecompensadas a través del proceso de fotosíntesis, mediante el cual la planta transforma parte de la energía solar recibida en energía química. Por lo tanto, la acumulación de biomasa en el cultivo

depende de la cantidad de radiación solar disponible, de la capacidad para interceptarla y de la eficiencia con que el cultivo convierte la radiación capturada en biomasa vegetal (Totis., 2015).

Durante los primeros días del ciclo, el crecimiento del cultivo está en su mayor parte orientado a generar nuevos tejidos foliares. Posteriormente, durante la etapa de encañe, el crecimiento del tallo es el que da cuenta de la mayor parte del aumento del peso total de la planta. Luego de la floración se detiene la producción de tejido foliar, el tallo continúa su incremento de peso durante un lapso de dos a tres semanas (debido a la acumulación de sustancias de reserva) e inmediatamente después los órganos reproductivos (granos) inician un acelerado proceso de crecimiento (Totis., 2015).

El resultado final del cultivo es la consecuencia de las múltiples interacciones que tiene con el ambiente que lo rodea, el cual varía en el tiempo y el espacio.

El rendimiento en grano queda determinado por la manera en que el cultivo particiona la biomasa acumulada durante su crecimiento entre los órganos de cosecha y el resto de la planta. Los rendimientos de maíz crecieron en forma sostenida en las últimas décadas. La notable mejora genética lograda (en potencial de rendimiento y en tolerancia a estrés, enfermedades, etc.), fue en buena medida responsable de ese crecimiento, acompañada por mejoras en el manejo de los cultivos (fertilización, herbicidas, mecanización, etc.).

### **Rendimiento y estrés hídrico**

La consecuencia inmediata de un déficit hídrico sobre el cultivo es la pérdida de turgencia en sus tejidos que resulta en una menor tasa de crecimiento y menor tamaño final de los órganos que se encuentran creciendo activamente en el momento de ocurrencia del estrés. El efecto de las deficiencias hídricas sobre la producción del cultivo opera, en gran parte, a través de la reducción de la expansión de las hojas y, en consecuencia, de la eficiencia de captación de radiación, aunque sequías intensas afectan también su eficiencia fotosintética (Santillán et al., 2013).

### **CWSI (índice de estrés hídrico en el cultivo)**

El CWSI (por sus siglas en inglés), se basa en la determinación de la tasa de transpiración actual de un cultivo mediante la medición de la temperatura del dosel y el déficit de presión de vapor.

El método del CWSI, es una medida de la transpiración que ocurre en una planta en el tiempo de medición, mediante el registro de la temperatura de la planta y el déficit de presión de vapor del agua. Este enfoque metodológico es necesario para la correcta programación del riego en cultivos agrícolas en campo abierto. Las mediciones del estrés hídrico de los cultivos combinado con sistemas eficientes de riego permiten maximizar el rendimiento a través de un manejo eficiente del riego (Garrot et al., 1990). La termometría infrarroja es una herramienta sencilla, práctica, no destructiva y confiable para la estimación del estrés hídrico de los cultivos, la cual se ha aplicado en una diversidad de cultivos agrícolas en la programación del riego y es útil para la predicción de rendimientos.

### **Teoría del índice de estrés hídrico del cultivo**

El agua evaporada por una superficie vegetal funciona al mismo tiempo como un estabilizador de la temperatura de las hojas ante la demanda evapotranspirativa de la atmósfera. A partir de esto, Jackson et al. (1981) presentaron la teoría del balance energético que separa la radiación neta en calor sensible del aire y calor latente que incide en la transpiración. Cuando el cultivo se somete a estrés hídrico, los estomas se cierran, la transpiración decrece y la temperatura de la hoja aumenta. Cuando una planta transpira sin estrés hídrico, la temperatura de la hoja es entre 1 – 4 °C menor que la temperatura ambiental, en este caso el CWSI del cultivo es 0. Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende y puede alcanzar de 4 a 6 °C más que la temperatura del aire. En este caso, el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar; cuando la planta está muerta o no transpira durante mucho tiempo, el CWSI es 1.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Localización y descripción del experimento**

La investigación se realizó de junio a noviembre del 2016, en la Unidad Buenavista de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, localizada en las coordenadas geográficas: 25° 21' 20" N y 101° 01' 30" O a una altitud de 1743 m.

### **Tratamientos evaluados y manejo del cultivo**

El experimento se estableció con un diseño de bloques al azar, con 5 tratamientos y cuatro repeticiones o unidades experimentales.

Los tratamientos se establecieron en parcelas con dimensión de 9.6 \* 30 metros para cada una, las cuales se dividieron en cuatro unidades experimentales iguales.

La siembra se efectuó el 17 de junio del 2016, con separación de 0.8 m entre surcos y 0.20 m entre plantas en el surco, la densidad de población fue de 62,500 plantas por hectárea. Previo a la siembra se efectuó la preparación del terreno con barbecho y un paso de rastra así como fertilización de presembrado para evitar deficiencias de nutrientes en el suelo y se efectuó el riego de presembrado (11 de junio del 2016).

El cultivo fue suministrado de agua mediante un sistema de riego por aspersión. Los regímenes de riego programados fueron cinco (Cuadro 3) y consistieron en aplicar los riegos durante el ciclo del cultivo, cuando el CWSI del cultivo alcanzara valores de menor (0.25) a mayor estrés hídrico (0.7) y aplicando las láminas de riego requeridas al 100%.

El control de plagas se llevó a cabo mediante monitoreo del cultivo y la colocación de trampas con feromonas que ayudan a conocer la existencia y la abundancia de la población del gusano cogollero (*spodoptera frugiperda*) en los cultivos de maíz y asesoría técnica mediante las cuales se tomaron decisiones oportunas para la aplicación de insecticidas.

Se realizaron tres aplicaciones de fertilizantes con dosis 253-44-27 (N – P – K en kg ha<sup>-1</sup>) basado en los análisis antes de la siembra.

El laboreo del cultivo fue labranza convencional y se realizó de acuerdo a las necesidades que presentaba terreno y el cultivo.

Cuadro 3. Valores de CWSI programados para efectuar los riegos en el cultivo de maíz variedad ASGROW 7573.

Tratamiento	CWSI Etapa vegetativa	CWSI Etapa reproductiva
1	0.25	0.25
2	0.5	0.35
3	0.5	0.50
4	0.7	0.60
5	0.7	0.70

$$CWSI = \frac{(T_h - T_a)_{Li} - (T_h - T_a)_X}{(T_h - T_a)_{Li} - (T_h - T_a)_L}$$

Donde:

CWSI= Índice de estrés hídrico del cultivo.

T<sub>h</sub> = Temperatura de las hojas (°C).

T<sub>a</sub> = Temperatura del aire (°C).

(T<sub>h</sub> – T<sub>a</sub>)<sub>Li</sub>= Límite inferior de no estrés hídrico (°C).

(T<sub>h</sub> – T<sub>a</sub>)<sub>Ls</sub>= Límite superior de máximo estrés hídrico (°C).

(T<sub>h</sub> – T<sub>a</sub>)<sub>X</sub>= Diferencia de temperatura medida diariamente (°C).

Los valores del CWSI fluctúan de “0” sin estrés a “1” máximo estrés (Taghvaeian et al., 2012).

## Evaluación en campo

Durante el ciclo del cultivo se realizaron muestreos de planta, muestreos de suelo, así como mediciones diarias de temperatura de la hoja, temperatura del ambiente y humedad relativa para la estimación del índice de estrés hídrico mediante el cual se realizaron los riegos. Se realizaron nueve muestreos en donde se cosecharon cuatro plantas ( $0.64 \text{ M}^2$ ) de las cuales se separaron hoja y tallo, se pesaron en fresco, se metieron a una estufa de secado a una temperatura de  $65^\circ\text{C}$  durante 96 horas, al retirarse de la estufa se obtuvo el peso seco. Se midió el área foliar de manera manual, multiplicando largo por ancho de cada hoja por el factor de corrección 0.75 para obtener el área por hoja y así calcular el Índice de Área foliar.

Durante el ciclo del cultivo se realizaron 21 muestreos (muestreos semanales) de contenido de humedad en el suelo mediante el método gravimétrico.

Antes del establecimiento del cultivo se obtuvieron muestras por estratos de 20 cm hasta 80 cm de suelo. Se llevaron estas muestras al Laboratorio de Aguas Residuales ubicado en el departamento de Riego y drenaje de la UAAAN, donde se realizaron estudios de fertilidad de suelo y estructura del suelo. Los resultados de los análisis se muestran en el cuadro 4.

Se realizaron mediciones diarias de temperatura del ambiente, temperatura del follaje y humedad relativa para la estimación del CWSI. Este índice fue estimado para la aplicación de los riegos.

Cuadro 4. Propiedades físico-químicas del suelo requeridas por el modelo.

	<b>Profundidad del suelo (cm)</b>			
	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>
<b>pH</b>	8.04	8.06	8.17	7.99
<b>C.E. (Ds/m)</b>	1.26	1.39	1.33	1.09
<b>Materia Orgánica (%)</b>	2.11	2.01	1.58	1.82
<b>Nitrógeno (%)</b>	0.10	0.09	0.08	0.09
<b>Fósforo (%)</b>	53.82	54.37	43.20	38.28
<b>Potasio (%)</b>	611	333	201.6	208.3
<b>Carbonatos totales (%)</b>	54.84	54.80	54.48	53.94
<b>Arcilla (%)</b>	30.24	31.44	31.76	32.96
<b>Limo (%)</b>	21.76	19.76	20.64	21.04
<b>Arena (%)</b>	48	48.8	47.6	46
<b>CC(%<i>, v/v</i>)</b>	27.66	26.81	25.77	24.94
<b>PMP (%<i>, v/v</i>)</b>	15.47	14.84	14.07	13.46

\* C.E.= Conductividad eléctrica. CC= Capacidad de campo. PMP= Punto de marchitez permanente.

### **Descripción del modelo**

El modelo CERES – Maize, necesita ser calibrado mediante la obtención de cinco coeficientes genéticos (P1, P2, P5, G2, G3 Y PHINT) de los cuales P1, P2, P5 y PHINT son los coeficientes que consideran aspectos fenológicos del cultivo mientras G2 y G3 están relacionados con el rendimiento del cultivo (cuadro 1.) DSSAT requiere datos climáticos para eso se recolectaron diario durante 1 año de una estación climática localizada a 500 metros del experimento. La información meteorológica requerida por el modelo y datos promedio mensuales de dichas variables se muestran en el cuadro 5.

Cuadro 5. Datos climáticos mensuales durante el ciclo del cultivo, requeridos por el modelo CERES – Maize

<b>Datos Climáticos</b>	<b>Mes</b>	<b>Junio</b>	<b>Julio</b>	<b>Agosto</b>	<b>Septiembre</b>	<b>Octubre</b>	<b>Noviembre</b>
<b>Temperatura</b>							
<b>mínima</b> <b>(°C)</b>		13.88	16.15	15.80	14.22	11.50	9.30
<b>Temperatura</b>							
<b>máxima</b> <b>(°C)</b>		28.24	29.34	27.06	25.08	25.09	19.23
<b>Humedad</b>							
<b>Relativa</b> <b>(%)</b>		62	57	72	77	64	80
<b>Velocidad</b>							
<b>del viento</b> <b>(km/día)</b>		3.94	4.15	3.17	2.33	2.48	2.75
<b>Horas Luz</b> <b>(Horas)</b>		9.07	8.11	7.12	6.86	8.12	5.94
<b>Precipitación</b> <b>(mm)</b>		55.2	60.7	173.8	63.6	8.1	58.9



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### **Estimación del CWSI durante el ciclo del cultivo maíz variedad Asgrow 7573**

Durante el desarrollo del cultivo, al inicio de la etapa vegetativa al tratamiento control T1 se le aplicaron dos riegos y a los otros cuatro tratamientos se les aplicó un riego, porque alcanzaron el índice programado, posteriormente en los meses de julio, agosto y septiembre (40 a 105 DDS, etapa vegetativa a fin de floración) ocurrieron lluvias (Cuadro 5). Los tratamientos durante este período tuvieron valores del índice de cero o cercanos a cero (sin estrés hídrico o mínimo) no efectuándose riegos en los tratamientos. Posteriormente en la fase de llenado de grano el índice mostró un mayor nivel de estrés hídrico en los tratamientos T3, T4 y T5 (Figura 4).

La termometría infrarroja es una herramienta sencilla, práctica, no destructiva y confiable para la estimación del estrés hídrico de los cultivos, la cual se ha aplicado en una diversidad de cultivos agrícolas en la programación del riego y es útil para la predicción de rendimientos (López et al 2009).

Idso (1982) menciona que el CWSI no es apropiado para regiones húmedas por que la radiación solar es menor y la planta no se encuentra con estrés hídrico.

### **Coefficientes genéticos**

Los coeficientes genéticos que presentaron el mejor ajuste para la simulación de crecimiento y rendimiento del tratamiento 1 para el cultivo maíz variedad ASGROW 7573 se presentan en el cuadro 6.

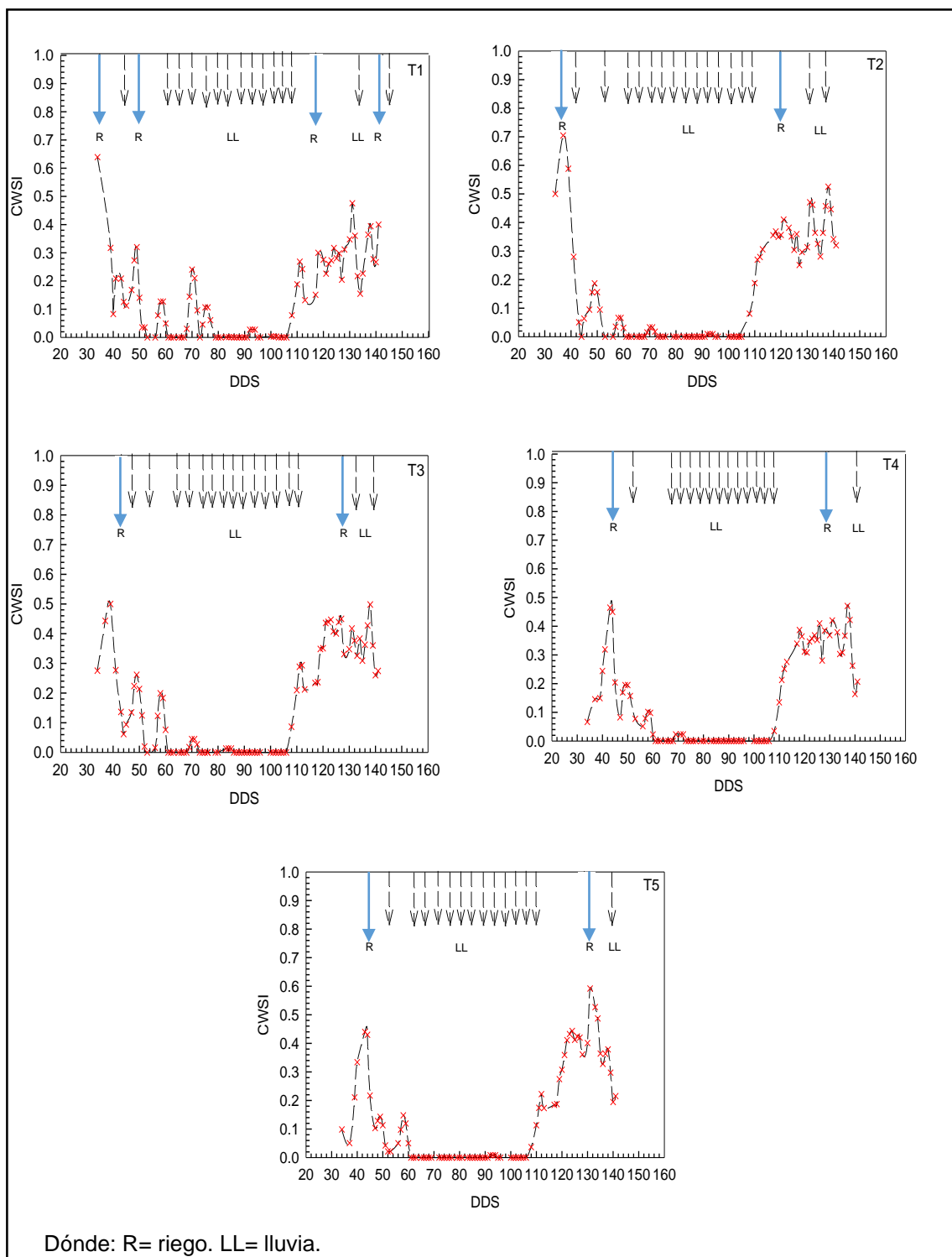


Figura 4. Evolución del CWSI durante el desarrollo del cultivo. Tratamiento 1 (T1); Tratamiento 2 (T2); Tratamiento 3 (T3); Tratamiento 4 (T4); Tratamiento 5 (T5).

Cuadro 6. Valores de los coeficientes genéticos para la variedad Asgrow 7573.

<b>Cultivar</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P5</b>	<b>G2</b>	<b>G3</b>	<b>PHINT</b>
<b>Asgrow 7573</b>	365.0	0.1	618.0	750.0	11.4	48.0

\* P1: unidades térmicas desde emergencia hasta el final de la etapa juvenil; P2: unidades térmicas durante la etapa juvenil; P5: unidades térmicas durante el llenado de grano; G2: Número potencial de granos por mazorca por planta; G3: Velocidad de llenado del grano; PHINT: unidades térmicas entre la aparición de cada hoja.

### **Desarrollo fenológico**

La simulación del desarrollo fenológico del cultivo muestra que el modelo CERES–Maize tiene buena precisión, las diferencias porcentuales entre los valores simulados y observados para días a la emergencia fue de 0% de diferencia, para la floración fue de -7% a 6% y para la madurez fisiológica fue de 1.2% a 6% (Cuadro 7). Wang et al. (2012) al Noroeste de China reportó resultados de madurez fisiológica semejantes a los de este trabajo. Soler et al. (2007) obtuvieron diferencias porcentuales similares a las de los tratamientos 1 y 2 de este trabajo para madurez fisiológica, afirmando que el modelo tiene la capacidad de simular con precisión aceptable esta variable.

Wang et al. (2012) al Noroeste de China obtuvieron resultados en madurez fisiológica semejantes a los de esta investigación.

Tojo et al. (2007) muestra diferencias porcentuales similares a las del tratamiento 1 y 2 de este trabajo para madurez fisiológica afirmando que el modelo tiene la capacidad de simular con precisión aceptable esta variable

Cuadro 7. Desarrollo fenológico en días después de la siembra para los cinco tratamientos del cultivo maíz variedad Asgrow 7573.

<b>Desarrollo fenológico</b>	<b>Simulados</b>	<b>Observados</b>	<b>Diferencia (días)</b>	<b>Diferencia (%)</b>
<b>Tratamiento 1</b>				
<b>Emergencia</b>	9	9	0	0
<b>Floración</b>	89	84	5	5.95
<b>Madurez fisiológica</b>	157	155	2	1.20
<b>Tratamiento 2</b>				
<b>Emergencia</b>	9	9	0	0
<b>Floración</b>	89	84	5	5.95
<b>Madurez fisiológica</b>	157	155	2	1.20
<b>Tratamiento 3</b>				
<b>Emergencia</b>	9	9	0	0
<b>Floración</b>	89	91	-2	-2.20
<b>Madurez fisiológica</b>	157	151	6	3.97
<b>Tratamiento 4</b>				
<b>Emergencia</b>	9	9	0	0
<b>Floración</b>	89	91	-2	-2.20
<b>Madurez fisiológica</b>	157	146	9	6.16
<b>Tratamiento 5</b>				
<b>Emergencia</b>	9	9	0	0
<b>Floración</b>	89	96	-7	-7.29
<b>Madurez fisiológica</b>	157	146	9	6.16

### **Rendimiento del cultivo**

Los valores observados y simulados, así como las diferencias porcentuales de los componentes en cosecha se muestran en el cuadro 8. En el tratamiento 1 el modelo Ceres – Maize simuló el rendimiento del cultivo con una precisión excelente mostrando una diferencia entre la variable medida y simulada de 0.06%, siendo la diferencia mínima en los cinco tratamientos. La máxima diferencia se presentó en el tratamiento 3 que fue de 27.49%, donde el modelo sobrestimó el resultado. Nouna et al. (2000) obtuvo diferencias porcentuales de -7.27 y -11.71, siendo estas diferencias mayores que las que reportan los tratamientos T1 Y T2 de esta investigación y menores que el T3, T4 y T5.

En peso de un grano se obtuvo una diferencia mínima de -4.08% para los tratamientos 1 y 2, y 11.90% para los tratamientos 3, 4 y 5. Estos valores porcentuales son semejantes a los que reportan Tojo et al. (2007) para condiciones subtropicales. Las diferencias encontradas en la simulación de número de granos por metro cuadrado van desde 2.73% hasta 11.93%, valores porcentuales similares fueron encontrados por Tojo et al. (2007) y señalo que se logró un buen ajuste por parte del modelo. Por lo anterior se asume que las diferencias encontradas en esta investigación fueron aceptables, para la obtención de un buen ajuste.

Rivetti (2006) reporto valores de número de grano por metro cuadrado inferiores a los de esta investigación, para el cultivo de maíz sin déficit hídrico en Córdoba Argentina.

Cuadro 8. Valores observados y simulados de los componentes de la cosecha para los cinco tratamientos del cultivo maíz.

<b>Componentes de cosecha</b>	<b>Simulados</b>	<b>observados</b>	<b>Diferencia (%)</b>
<b>Tratamiento 1</b>			
<b>Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	11589	11596	-0.06
<b>Peso de un grano (g)</b>	0.47	0.49	-4.08
<b>Granos por m<sup>2</sup></b>	2447	2366	3.42
<b>Tratamiento 2</b>			
<b>Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	11579	11239	3.03
<b>Peso de un grano (g)</b>	0.47	0.49	-4.08
<b>Granos por m<sup>2</sup></b>	2445	2368	3.25
<b>Tratamiento 3</b>			
<b>Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	11553	9062	27.49
<b>Peso de un grano (g)</b>	0.47	0.42	11.90
<b>Granos por m<sup>2</sup></b>	2440	2180	11.93
<b>Tratamiento 4</b>			
<b>Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	11573	9842	17.59
<b>Peso de un grano (g)</b>	0.47	0.42	11.90
<b>Granos por m<sup>2</sup></b>	2449	2338	4.75
<b>Tratamiento 5</b>			
<b>Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	11577	9764	18.57
<b>Peso de un grano (g)</b>	0.47	0.42	11.90
<b>Granos por m<sup>2</sup></b>	2445	2380	2.73

### Simulación de materia seca total aérea

Los resultados obtenidos en la simulación de materia seca total aérea de los tratamientos donde se observa que el que presenta mejor ajuste se obtuvo en el tratamiento 5 (e) obteniendo valores del coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.99, índice de concordancia ( $d$ ) = 0.99 y un RMSE = 1096 kg ha<sup>-1</sup>, en los tratamientos 1 (a), 2 (b) y 3 (c) se observa un valor de  $r^2 = 0.99$  y  $d = 0.98$ . El tratamiento 4 (d) fue el tratamiento que presentó un menor ajuste ( $r^2 = 0.98$ ;  $d = 0.98$ ; RMSE = 2421 kg ha<sup>-1</sup>) (Cuadro 9). Tojo et al. (2007), reportaron resultados de RMSE mayores que los de esta investigación y señalaron que la simulación fue satisfactoria.

Los datos estadísticos (coeficiente de determinación, índice de concordancia y cuadrado medio del error) obtenidos del modelo DSSAT, que representan la relación entre las variables observadas y las variables simuladas en materia seca total aérea, para los tratamientos de esta investigación se muestran en el cuadro 9.

Cuadro 9. Valores obtenidos de coeficiente de determinación ( $r^2$ ), índice de concordancia ( $d$ ) y cuadrado medio del error (RMSE) para materia seca total aérea durante el desarrollo del cultivo.

Tratamiento	$r^2$	$d$	RMSE
T1	0.99	0.98	2859
T2	0.99	0.98	2434
T3	0.98	0.98	2218
T4	0.98	0.98	2421
T5	0.99	0.99	1096

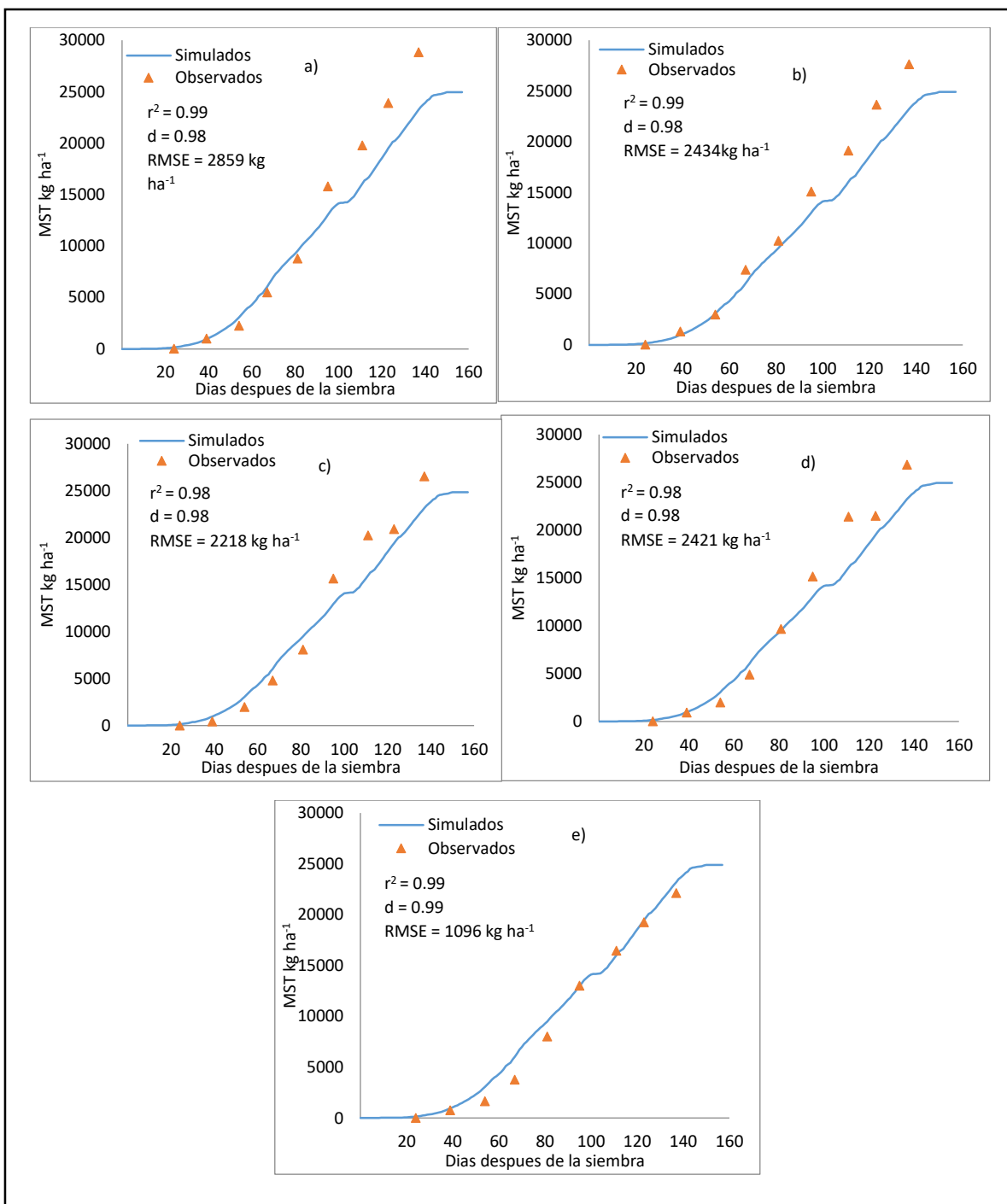


Figura 5. Materia Seca Total aérea (MST) observado y simulado durante el ciclo del cultivo maíz Asgrow 7573. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).



### Simulación de índice de área foliar

La simulación de índice de área foliar obtenida del modelo CERES – MAIZE se puede observar en la figura 6 (a-e), donde los datos estadísticos muestran el mejor ajuste para el tratamiento 2 (b) con un coeficiente de determinación de 0.97, índice de concordancia de 0.98 y un RMSE = 0.47. López – Cedrón et al. (2005) encontraron valores de índice de concordancia (d) para IAF menores a los de esta investigación al Noreste de España. Los valores máximos de IAF obtenidos fueron superiores a los obtenidos por Esteves et al. (2012) en una simulación para condiciones tropicales.

Los datos estadísticos (coeficiente de determinación, índice de concordancia y cuadrado medio del error) obtenidos del modelo DSSAT, que representan la relación entre las variables observadas y las variables simuladas en índice de área foliar, para los tratamientos de esta investigación se muestran en el cuadro 10.

Cuadro 10. Valores obtenidos de coeficiente de determinación ( $r^2$ ), índice de concordancia (d) y cuadrado medio del error (RMSE) para índice de área foliar durante el desarrollo del cultivo.

<b>Tratamiento</b>	<b><math>r^2</math></b>	<b>D</b>	<b>RMSE</b>
<b>T1</b>	0.95	0.97	0.61
<b>T2</b>	0.97	0.98	0.47
<b>T3</b>	0.93	0.98	0.51
<b>T4</b>	0.97	0.97	0.59
<b>T5</b>	0.94	0.94	0.77

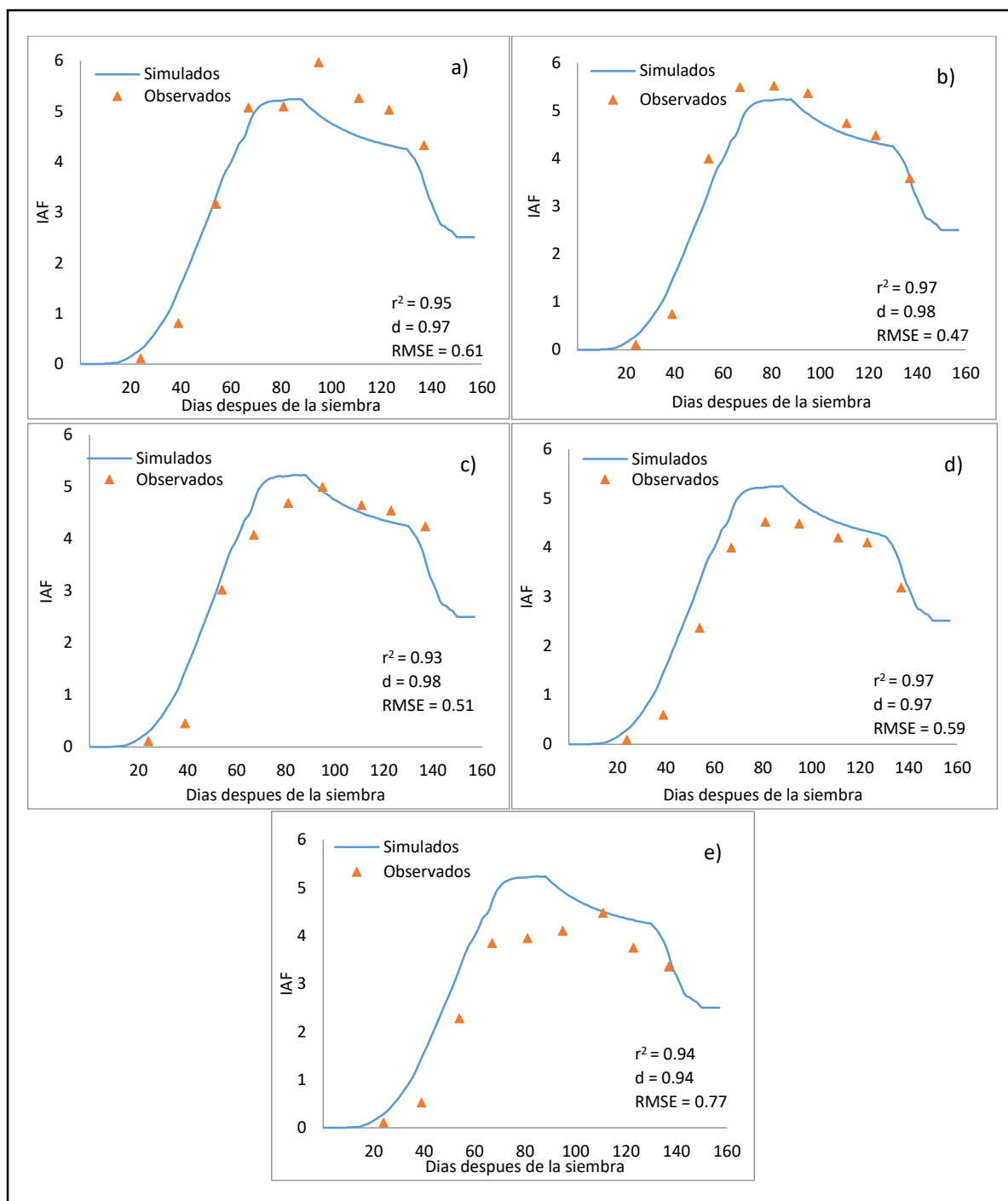


Figura 6. Índice de área foliar (IAF) observado y simulado durante el ciclo del cultivo maíz Asgrow 7573. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).

### Simulación de materia seca de tallo

En la simulación de materia seca de tallo (Figura 7 a - e) se muestra que la mejor calibración fue el tratamiento 5 (e), donde se obtuvo un  $r^2 = 0.89$ ,  $d = 0.97$  y  $RMSE = 794 \text{ kg ha}^{-1}$  (Cuadro 11). La simulación fue satisfactoria para los 5 tratamientos según cita Rojas et al (2011).

Los datos estadísticos (coeficiente de determinación, índice de concordancia y cuadrado medio del error) obtenidos del modelo DSSAT, que representan la relación entre las variables observadas y las variables simuladas en materia seca en tallo, para los tratamientos de esta investigación se muestran en el cuadro 11.

Cuadro 11. Valores obtenidos de coeficiente de determinación ( $r^2$ ), índice de concordancia ( $d$ ) y cuadrado medio del error (RMSE) para materia seca de tallo durante el desarrollo del cultivo.

<b>Tratamiento</b>	<b><math>r^2</math></b>	<b><math>d</math></b>	<b>RMSE</b>
<b>T1</b>	0.86	0.94	1235
<b>T2</b>	0.85	0.92	1391
<b>T3</b>	0.89	0.96	956
<b>T4</b>	0.84	0.93	1317
<b>T5</b>	0.89	0.97	794

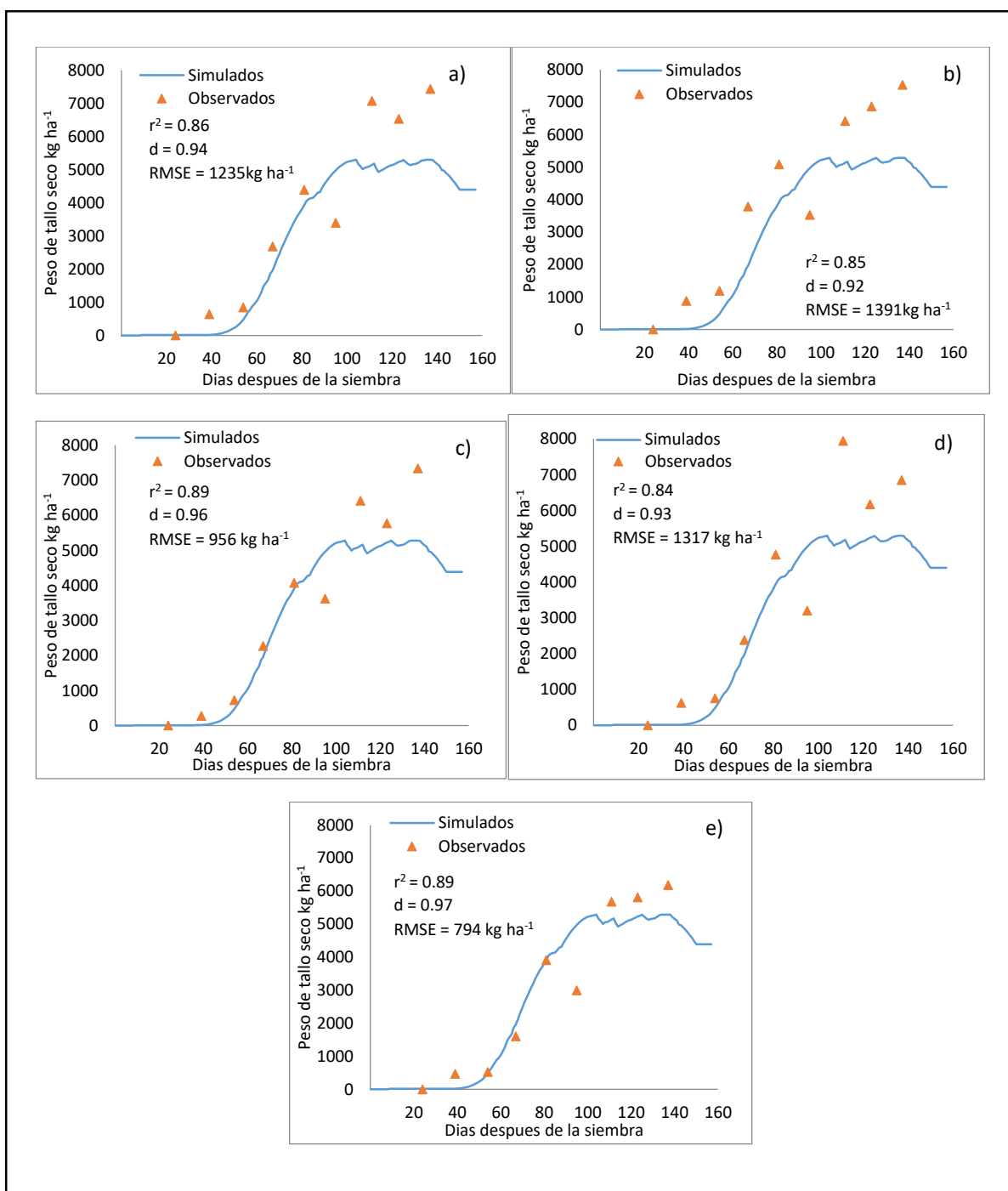


Figura 7. Materia Seca en Tallo, observado y simulado durante el ciclo del cultivo maíz Asgrow 7573. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).

### Simulación de materia seca en hoja

En la simulación de materia seca en hojas el modelo CERES – Maize presento un mejor ajuste en el tratamiento 2 como se observa en la figura 8 (b) con un valor del coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.94, índice de concordancia ( $d$ ) = 0.90 y un RMSE = 1028 kg ha<sup>-1</sup> (Cuadro 12). Rojas et al (2011) reportó valores similares en el coeficiente de determinación a los de esta investigación al sur de Nuevo León México.

Los datos estadísticos (coeficiente de determinación, índice de concordancia y cuadrado medio del error) obtenidos del modelo DSSAT, que representan la relación entre las variables observadas y las variables simuladas en materia seca en hoja, para los tratamientos de esta investigación se muestran en el cuadro 12.

Cuadro 12. Valores obtenidos de coeficiente de determinación ( $r^2$ ), índice de concordancia ( $d$ ) y cuadrado medio del error (RMSE) para materia seca de hoja durante el desarrollo del cultivo.

<b>Tratamiento</b>	<b><math>r^2</math></b>	<b><math>d</math></b>	<b>RMSE</b>
<b>T1</b>	0.89	0.89	1114
<b>T2</b>	0.94	0.90	1028
<b>T3</b>	0.91	0.86	1285
<b>T4</b>	0.94	0.84	1365
<b>T5</b>	0.94	0.79	1551

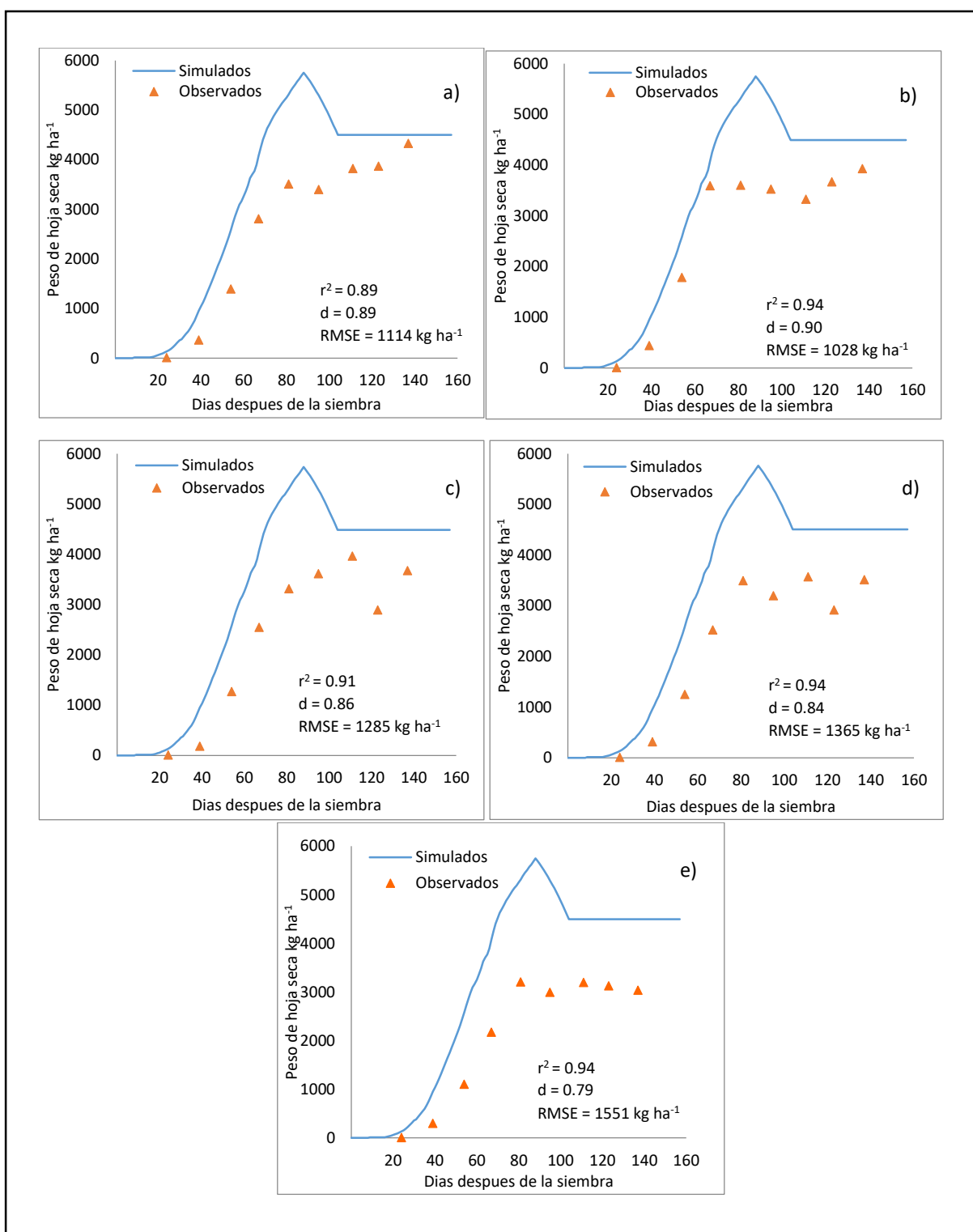


Figura 8. Materia seca en hojas observado y simulado durante el ciclo del cultivo maíz Asgrow 7573. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).

## CONCLUSIONES

1. Se calibró el modelo CERES – Maize del software DSSAT para la variedad Asgrow 7573, simulando el crecimiento y desarrollo bajo diferentes condiciones hídricas.
2. Se obtuvieron los coeficientes genéticos para el cultivo maíz variedad Asgrow 7573.
3. El modelo CERES-Maize fue capaz de simular con precisión la fenología del cultivo en los cinco tratamientos, así como el peso y rendimiento de grano en los dos tratamientos de menor estrés hídrico (1 y 2), sin embargo, el ajuste fue menor en los tratamientos bajo mayor estrés hídrico en la etapa de llenado de grano (3, 4 y 5).
4. En general, la biomasa total y el IAF también fueron bien simulados. El modelo fue menos preciso al simular la materia seca en hojas y tallos en la etapa reproductiva subestimando el peso de tallo y sobrestimando el de las hojas. Futuras evaluaciones del modelo con esta variedad son necesarias para evaluar mayor grado de estrés hídrico en las etapas vegetativas, de floración y llenado de grano, a fin de confirmar la capacidad del modelo para simular desarrollo y crecimiento bajo éstas condiciones de manejo.

## REFERENCIAS

- Alagarswamy, G., Singh, P., Hoogenboom, G., Wani, S. P., Pathak P., Virmani, S., M. 2000. Evaluation and application of the CROPGRO- Soybean simulation model in a Vertic Inceptisol. *Agricultural Systems*. 63: 19-32.
- Bannayan, M. and G. Hoogenboom. 2009. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crops Research*, 111(3), 290-302.
- Chisanga, C. B., E. Phiri, C. Shepande, and H. Sickingabula. 2015. Evaluating CERES-Maize model using planting dates and nitrogen fertilizer in Zambia. *Journal of Agricultural Science*. 7 (3): 79.
- Chung, U., S. Gbegbelegbe, B. Shiferaw, R. Robertson, J. I. Yun, K. Tesfaye and Sonder, K 2014. Modeling the effect of a heat wave on maize production in the USA and its implications on food security in the developing world. *Weather and Climate Extremes*. 5: 67-77.
- Dallacort, R., Lourenço, F, P, S., Teixeira, F, R., Andrade, G, A, C., Rezende, R., Locks, G, R, M. 2011. Simulation of bean crop growth, evapotranspiration and yield in Paraná State by the CROPGRO-Drybean model. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 33 (3): 429-436.
- Esteves, M., P. E. Román, J. S. Beaver, M. A. Muñoz and A. Armstrong. 2012. Determinación de coeficientes genéticos en tres cultivares y un híbrido de maíz. *J. Agríc. Univ. P.R.* 96: 7-75.
- Flores, G, H., Ojeda, B, W., Flores, M, H., Sifuentes, I, E., Mejía, S, E. 2013. Simulación del rendimiento de maíz (*Zea Mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. *Agrociencia*. 47: 347-359.
- Guevara, E. 2007. La simulación del Desarrollo, Crecimiento y Rendimiento en maíz. INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) EEA (Estación Experimental Agropecuaria), Pergamino, Buenos Aires, ARG. 37 pp.
- He, J., M. D. Dukes, G. J. Hochmuth, J. W. Jones and W. D. Graham. 2012. Identifying irrigation and nitrogen best management practices for sweet corn production on sandy soils using CERES-Maize model. *Agricultural Water Management*. 109: 61-70.
- Hernández, N., Soto, F., Caballero, A. 2009. Modelos de simulación de cultivos. características y usos. *Cultivos Tropicales*. 30 (1): 73-82.



- Hoogenboom G., J. W. Jones, P. W. Wilkens, L.A. Hunt, C.H. Porter, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, K.J. Boote, U. Singh, G. Uehara, W.T. Bowen, A.J. Gusman, A.S. Du Toit, J. White, G.Y. Tsuji. 2003. Decision Support System for Agrotechnology Transfer: version 4.0. Honolulu: University of Hawaii. [CD-ROM]
- Idso, S. B. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric. Meteorol.* 27:59-70
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., Ritchie, J. T. 2003. The DSSAT cropping system model. *Europ. J. Agronomy.* 18: 235-265.
- Liu, H. L., Yang, J. Y., Tan, C. S., Drury, C. F., Reynolds, W. D., Zhang, T. Q., Bai, Y. L., Jin, J., He, P., Hoogenboom, G. 2011. Simulating water content, crop yield and nitrate-N loss under free and controlled tile drainage with subsurface irrigation using the DSSAT model. *Agricultural Water Management.* 98: 1105–1111.
- López – Cedrón, F. X., K. J. Boote, B. Ruíz-Nogueira and F. Sau. 2005. Testing CERES-Maize versions to estimate maize production in a cool environment. *Europ. J. Agronomy* 23: 89 – 102.
- López. L. R., R. Arteaga, M. A. Vázquez, i. López and I. Sánchez. 2009. Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Agricultura Técnica en México.* 35 (1): 92 – 106.
- Manlla, A. and Salvagiotti, F. 2011. Validación del modelo Hybrid maize en condiciones óptimas de crecimiento. *Inta EEA Oliveros.* 46: 7 – 10.
- Negm, L. M., Youssef, M. A., Skaggs, R. W., Chescheir, G. M., Jones, J. 2014. DRAINMOD–DSSAT model for simulating hydrology, soil carbon and nitrogen dynamics, and crop growth for drained crop land. *Agricultural Water Management.* 137: 30–45.
- Nouna, B. B., N. Katerji and M. Mastrorilli. 2000. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. Evaluation of model performance. *European Journal of Agronomy.* 13(4): 309-322.
- O’Neal, M. R., Frankenberger, J. R., Ess, D. R. 2002. Use of CERES-Maize to study effect of spatial precipitation variability on yield. *Agricultural Systems.*
- Payero J.O. and Irmak S. 2013. Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean. *Agricultural Water Management.* 129: 31– 43.
- Quemada, M., Guibert M., López, J. 1999. Aplicación del modelo CERES para la simulación de los perfiles de humedad y de nitratos en el suelo bajo cultivo

- de trigo. Estudios de la zona no saturada del suelo. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón. ICIA: Tenerife. 147-150.
- Quiring, S, M and R. D. Legates. 2008. Application of CERES-Maize for within-season prediction of rainfed corn yields in Delaware, USA. *Agricultural and forest meteorology*. 148 (6): 964 – 975.
- Reyes -Méndez, C. A., M. A. Cantú-Almaguer, and G. Vázquez-Carrillo. 2007. H-440, nuevo híbrido de maíz tolerante a sequía para el noreste de México. *Agricultura técnica en México*. 33(2): 201-204.
- Rodríguez, A., Arias, R, L, M. 2014. La milpa y el maizal: retos al desarrollo rural en México y Perú. *Etnobiología*. 12 (3): 76 – 89.
- Rojas, M, C., Díaz, S, H., Aizpuru, G, E., López, T, R., Rincón, S, F. 2011. Calibración de DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) para la producción de forraje de tres cultivares de maíz (*Zea Mays L.*) en el sur de Nuevo León, México. *Agraria nueva época*. 8 (2).
- Santillán Gutiérrez, E., G. Dávila Vázquez, J. De Anda Sánchez y J.J. Díaz Torres. 2013. Assessment of hydric balance through climatic variables, in the Cazonos River Basin, Veracruz, Mexico. *Ambient. Água*. 8(3). 104-117.
- Sau, F., López, C, F. X., Confalone, A, E., Lizaso, J, I. 2010. Modelos de simulación del cultivo de maíz: fundamentos y aplicaciones en España. *Pastos*. 40 (2): 117 – 138.
- Serratos, H, J, A. 2009. El origen y la diversidad del maíz en el continente americano. *Greenpeace*. 1: 1-6.
- Soler, C. M. T., P. C., Sentelhas and G. Hoogenboom. 2007. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal of Agronomy*. 27 (2): 165-177.
- Soltani, A. and G. Hoogenboom. 2007. Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crops Research*. 103: 198–207.
- Steven, Q, M., Legates, R, D. 2008. Application of CERES-Maize for within-season prediction of rainfed corn yields in Delaware, USA. *agricultural and forest meteorology*. 148: 964 – 975.
- Timsina, J., Humphreys E. 2006. Performance of CERES-Rice and CERES Wheat models in rice–wheat systems: A review. *Agricultural Systems* 90: 5–31.

- Tojo, S.C.M., P.C. Sentelhas and G. Hoogenboom. 2007. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *Europ. J. Agronomy*. 27: 165–177.
- Totis Z. L.E. 2015. Requerimientos agroclimáticos del cultivo de maíz. INTA. 9 – 22.
- Wang, S., H. Li, Y. Yang, H. Wang, Y. Yang and Y. Jia. 2012. Using DSSAT Model to assess spring wheat and maize water use in the arid oasis of Northwest China. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 10 (1): 911-918.