

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO, RENDIMIENTO Y BALANCE DE AGUA EN
EL SUELO EN TRIGO (*Triticum turgidum* L.) VARIEDAD JÚPARE C2001 EN
RELACIÓN A CONDICIONES DE MANEJO DE AGUA Y FECHAS DE
SIEMBRA CON EL MODELO CERES DE DSSAT

Tesis

Que presenta VERÓNICA CORTEZ MALDONADO
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN


Saltillo, Coahuila

Noviembre de 2016

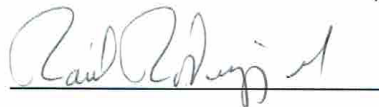
SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO, RENDIMIENTO Y BALANCE DE AGUA EN
EL SUELO EN TRIGO (*Triticum turgidum* L.) VARIEDAD JÚPARE C2001 EN
RELACIÓN A CONDICIONES DE MANEJO DE AGUA Y FECHAS DE
SIEMBRA CON EL MODELO CERES DE DSSAT

Tesis

Elaborada por VERÓNICA CORTEZ MALDONADO 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




Dr. Raúl Rodríguez García
Asesor



Dr. Alejandro Zermeño González
Asesor



M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos
Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Saltillo Coahuila

Noviembre de 2016

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, institución que me ha formado profesionalmente, en esta ocasión también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico durante mis estudios de posgrado.

A mis asesores, en especial al Dr. Raúl Rodríguez García por su dedicación tiempo, paciencia y seguimiento de esta investigación durante todo el posgrado, al M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos por capacitarme en el manejo del programa, a la Dra. Diana Jasso Cantú, por su apoyo y sugerencias en la revisión del presente material, en la búsqueda de siempre mejorarlo y al Dr. Alejandro Zermeño González por su interés en los avances de la investigación y por mostrarme su percepción en la importancia de lo académico pero también de los valores.

Agradezco al equipo de trabajo del laboratorio de fitoquímica de la universidad: T.A. María Guadalupe Moreno Esquivel, T.A. Ma. Leticia Rodríguez González, T.A. Olga Leticia Solís Hernández, C. Juan José Valenzuela Cabrera por su apoyo en la realización de la presente investigación, especialmente al personal de campo que labora en el jardín hidráulico: Lorenzo Villa Sandoval y Rolando de Jesús Méndez Betancourt por su disposición en las realización de las prácticas de manejo del cultivo y a los estudiantes de licenciatura por su tiempo y apoyo en la obtención de los datos de campo.

A la T.A. Josefina González de la Cruz responsable del laboratorio de RASPA (Relación agua- suelo- planta- atmósfera) por su disposición de apoyarme, a la Biol. Silvia Guerrero Martínez y a la Lic. Ma. Del Socorro Mireles Vázquez del Departamento de Riego y Drenaje por su colaboración en los el análisis de muestras de suelo realizados.

DEDICATORIA

De manera muy especial dedico el presente trabajo a José Ángel, Paola y Luis Fernando por ser el motivo más importante que me ha impulsado a ser mejor día a día y a mi esposo Pascual por confiar en mi capacidad de salir adelante ante situaciones difíciles, siempre con la fe en dios.

A mis Padres y hermanos que aún con la distancia siempre están a mi lado.

A mis compañeros y amigos quienes me han mostrado las diferentes formas de ver la vida.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo General	3
Objetivos Específicos.....	3
Hipótesis	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Modelo	4
Simulación	4
Aplicación en la agricultura	7
Descripción del modelo CERES-Trigo	10
Estructura de los módulos y sub módulos de DSSAT	13
Módulo de clima	13
Módulo de suelo.....	13
Sub módulo dinámica del suelo	14
Sub módulo agua del suelo.....	14
Sub módulo balance de carbono y nitrógeno en el suelo	14
Sub módulo temperatura del suelo	15
Módulo de suelo – planta – atmósfera	15
Módulo crecimiento individual de la planta.....	15
Módulo de manejo	16
Información requerida para operar DSSAT	16
Datos experimentales (FILE X):.....	17
Coeficientes Genéticos (.CUL):.....	18
Datos del perfil de suelo (.SOIL):.....	20

Datos del Clima (.WTH):	21
Valores medios de los datos observados (.ccA)	21
Datos promedio observados en las fechas de muestreo (.ccT)	22
Datos requeridos para calibrar DSSAT	23
Evaluación y validación del modelo	24
Simulación en cereales	24
Producción del cultivo de trigo en México	27
Producción de trigo en Coahuila	27
MATERIALES Y MÉTODOS	28
Localización y descripción del experimento	28
Tratamientos y condiciones de manejo	28
Información climática y de suelo	30
Calibración del modelo	32
Evaluación estadística del modelo	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
Coeficientes genéticos obtenidos de la calibración.....	34
Desarrollo fenológico	34
Simulación del rendimiento y sus componentes a la cosecha	35
Simulación de la materia seca total	37
Simulación del índice de área foliar	40
Simulación de materia seca en hojas	43
Simulación del balance de agua en el suelo	45
CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS	49

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Coeficientes genéticos DSSAT para CERES – Trigo.....	19
Cuadro 2. Datos experimentales requeridos por el archivo A.	22
Cuadro 3. Datos experimentales requeridos por el archivo T.	22
Cuadro 4. Tratamientos y condiciones de manejo evaluados en la investigación	29
Cuadro 5. Valores promedio climatológicos de noviembre 2015 a mayo 2016.31	
Cuadro 6. Variables de las propiedades físicas y químicas del suelo requeridas por el modelo DSSAT para el sitio experimental en Saltillo, Coahuila, México. 31	
Cuadro 7. Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio del suelo correspondiente a cada tratamiento.	31
Cuadro 8. Valores de los coeficientes genéticos obtenidos para la variedad Júpare C2001.	34
Cuadro 9. Desarrollo fenológico simulado y observado (en días después de la siembra) para los cinco tratamientos del cultivo de trigo variedad Júpare C2001.	35
Cuadro 10. Valores simulados y observados de rendimiento, peso de un grano y granos a la cosecha por m ² , en los 5 tratamientos del cultivo de trigo variedad Júpare C2001.	36
Cuadro 11. Comparación de promedios observados y simulados durante el ciclo del cultivo en materia seca total (kg ha ⁻¹), coeficiente de determinación (R ²), cuadrado medio del error (RMSE) e índice de concordancia (<i>d</i>).	39
Cuadro 12. Valores absolutos simulados y observados de la materia seca total a la cosecha para los cinco tratamientos.	39
Cuadro 13. Comparación de valores promedio observados y simulados de índice de área foliar durante el ciclo del cultivo, coeficiente de determinación (R ²), cuadrado medio del error (RMSE) e índice de concordancia (<i>d</i>).	42
Cuadro 14. Valores del máximo índice de área foliar observado y simulado para cada tratamiento del cultivo de trigo variedad Júpare C2001.	42
Cuadro 15. Comparación de valores promedio observados y simulados de materia seca parcial en hojas durante el ciclo del cultivo, coeficiente de	

determinación (R^2), cuadrado medio del error (RMSE) e índice de concordancia (d). 45

Cuadro 16. Valores promedios observados y simulados del contenido de agua en el suelo durante el ciclo del cultivo (mm) coeficiente de determinación (R^2), cuadrado medio del error (RMSE) e índice de concordancia (d). 47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de los archivos de entrada y salida usados por los modelos de cultivos de DSSAT v4.5 (Hoogenboom et al., 2010).	12
Figura 2. Representación esquemática de la estructura modular del DSSAT – CSM y los componentes v4.5 (Hoogenboom et al., 2010).....	17
Figura 3. Localización geográfica del área de estudio.	28
Figura 4. Representación esquemática del tamaño de las parcelas experimentales (tratamientos).....	30
Figura 5. Materia Seca Total (MST, kg ha ⁻¹) observado y simulado durante el ciclo del cultivo, calibrados en el modelo CERES-Wheat para el cultivar Júpare C2001. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).	38
Figura 6. Índice de área foliar observado y simulado, calibrados en el modelo CERES-Wheat para el cultivar Júpare C2001. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).	41
Figura 7. Materia seca parcial en hojas (MSH, kg ha ⁻¹) observado y simulado, calibrados en el modelo CERES-Wheat para el cultivar Júpare C2001. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).	44
Figura 8. Contenido de agua en el suelo observado y simulado durante el ciclo del cultivo (mm), calibrados en el modelo CERES-Wheat para el cultivar Júpare C2001. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).	46

RESUMEN

SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO, RENDIMIENTO Y BALANCE DE AGUA EN EL SUELO EN TRIGO (*Triticum turgidum* L.) VARIEDAD JÚPARE C2001 EN RELACIÓN A CONDICIONES DE MANEJO DE AGUA Y FECHAS DE SIEMBRA CON EL MODELO CERES DE DSSAT

POR

VERÓNICA CORTEZ MALDONADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DRA. DIANA JASSO CANTÚ - ASESOR-

Saltillo, Coahuila.

Noviembre 2016

RESUMEN

Los modelos de simulación mecanicistas pueden ser utilizados para evaluar cuantitativamente con exactitud, alternativas de manejo agronómico de cultivos, en diferentes suelos y condiciones climáticas, ahorrando tiempo en la evaluación y a un menor costo. Los modelos son herramientas para apoyar la planificación de actividades de investigación, transferencia tecnológica y desarrollo agrícola. El rendimiento promedio nacional de trigo en México es de 5 toneladas por hectárea y en Coahuila es de 3 toneladas por hectárea, principalmente de trigo duro o cristalino, en este contexto con el fin de mejorar la productividad del cultivo de trigo (*Triticum turgidum* L.) variedad Júpare C2001, hubo la necesidad de calibrar y validar modelo CERES-trigo de DSSAT para esta variedad, para predecir el crecimiento y rendimiento sembrado en dos fechas y diferentes regímenes de riego, y así disponer de una herramienta para simular y predecir el comportamiento del cultivo en otras localidades del estado. El estudio se realizó de noviembre de 2015 a junio de 2016 en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Saltillo, Coahuila, México. El experimento se realizó con un diseño de bloques al azar, cinco tratamientos con cuatro repeticiones. Los coeficientes genéticos se obtuvieron experimentalmente con el tratamiento en condición óptima en la segunda fecha de siembra, y se validaron para las otras cuatro condiciones de manejo. El modelo simuló con precisión aceptable los días a la antesis (diferencias de -12 a +8 días), días a la madurez (-10 a +11 días), en el rendimiento de grano solo dos tratamientos de la segunda fecha tuvieron buen ajuste. Para materia seca total, índice de área foliar y materia seca en hojas balance de agua en el suelo hubo un buen ajuste en los tratamientos de la segunda fecha de siembra no así para los tratamientos de la primera fecha que tuvieron un ajuste bajo, lo cual indicaría que los coeficientes genéticos obtenidos para una fecha de siembra, tendrían limitaciones para efectuar una simulación aceptable en otra fecha.

Palabras clave: DSSAT, CERES-Trigo, Simulación, Modelo, Coeficientes genéticos, *Triticum turgidum* L.

ABSTRACT

SIMULATION OF GROWTH, PERFORMANCE AND BALANCE OF WATER IN
THE WHEAT IN WHEAT (*Triticum turgidum* L.) JUPPARE VARIETY C2001 IN
RELATION TO WATER MANAGEMENT CONDITIONS AND SOWING DATES
WITH THE CERES MODEL OF DSSAT

BY

VERÓNICA CORTEZ MALDONADO

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

PhD. DIANA JASSO CANTÚ - ADVISOR-

Saltillo, Coahuila.

November 2016

ABSTRACT

Mechanistic simulation models can be used to evaluate quantitatively and accurately, agronomic crop management alternatives in different soils and climatic conditions, saving time in the evaluation and at a lower cost. Models are tools to support the planning of research, technology transfer and agricultural development activities. The average national yield of wheat in Mexico is 5 tons per hectare and in Coahuila is 3 tons per hectare, mainly durum or crystalline wheat, in this context in order to improve the productivity of wheat (*Triticum turgidum* L.) Júpare C2001 variety, there was a need to calibrate and validate the CERES-wheat model of DSSAT for this variety, to predict the growth and yield sown in two dates and different irrigation regimes, and thus to have a tool to simulate and predict the behavior Of the crop in other localities of the state. The study was conducted from November 2015 to June 2016 at the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Saltillo, Coahuila, Mexico. The experiment was performed with a randomized block design, five treatments with four replicates. The genetic coefficients were obtained experimentally with the treatment in optimal condition in the second date of sowing, and were validated for the other four management conditions. The model simulated with acceptable precision the days to the anthesis (differences of -12 to +8 days), days to maturity (-10 to +11 days), in grain yield only two treatments of the second date had good adjustment . For total dry matter, leaf area index and leaf dry matter balance of water in the soil there was a good adjustment in the treatments of the second planting date, not so for the treatments of the first date that had a low adjustment, which Would indicate that the genetic coefficients obtained for a sowing date would have limitations to perform an acceptable simulation on another date.

Key words: DSSAT, CERES-Wheat, Simulation, Model, Genetic coefficients, *Triticum turgidum* L.

INTRODUCCIÓN

Los modelos mecanistas de simulación de los cultivos, son representaciones matemáticas de los principales procesos implicados en el desarrollo, crecimiento y producción de un cultivo (Bouman *et al.*, 1996). Ellos integran el conocimiento adquirido por medio de la experimentación e innovación tecnológica en el campo de las ciencias biológicas, físicas y químicas relacionadas a sistemas de producción agrícola (Andarzian *et al.*, 2015). En los cultivos tienen varias aplicaciones actuales y potenciales, en respuesta a temas relacionados con la investigación, el manejo y la planificación (Hernández *et al.*, 2009). Al implementar modelos se reducen los riesgos económicos y de producción, el uso de estos ayuda a tomar decisiones más acertadas (DeJonge *et al.*, 2007).

En la agricultura es más frecuente el uso de modelos de simulación por los científicos, técnicos y productores agrícolas, los cuales han dado respuesta a factores de manejo en cultivos (Haefner, 2005). Así mismo representan una herramienta para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales (Arora *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2013), los modelos se utilizan para simular el desarrollo y crecimiento de los cultivos bajo diferentes escenarios de los componentes que integran un sistema productivo, considerando que los factores que influyen en la producción son variables (Wu *et al.*, 2013). Así mismo para evaluar el impacto en los cultivos de los futuros cambios climáticos (Semenov *et al.*, 2014 y Valizadeh *et al.*, 2014). Algunos de los modelos de simulación más comunes son: DSSAT (Decisión Support System for Agrotechnology Transfer) (Jones *et al.*, 2003); EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) (Williams *et al.*, 1990); SWAT (Soil & Water Assessment Tool) (Arnold *et al.*, 1991); CropSyst (Cropping Systems Simulation Model) (Stockle y Nelson, 1994); APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) (McCown *et al.*, 1996).

El sistema computacional DSSAT (Sistema de Apoyo para la Toma de Decisiones en la Transferencia de Agrotecnología) consta de nueve modelos para 28 cultivos de importancia económica y ha demostrado alta

confiabilidad para simular el crecimiento, desarrollo y rendimiento bajo diferentes condiciones de clima, suelo y manejo (Jones *et al.*, 2003). Integra los modelos CERES maíz, arroz, sorgo, cebada y trigo (Hoogenboom *et al.*, 2010). En específico el modelo CERES - Trigo (Arora *et al.*, 2007), el cual cuantifica las respuestas físicas y químicas del cultivo al efecto del medio ambiente, permite analizar resultados y representar gráficamente simulaciones (cultivo, procesos del suelo, insectos, malezas y enfermedades), evalúa diferentes prácticas de manejo (rotación de cultivos), simula la producción de uno o varios ciclos continuos del cultivo (Singh *et al.*, 2008;; Wu *et al.*, 2013; Andarzian *et al.*, 2015), realiza cálculos diarios del avance de la fenología (Hodges y Ritchie, 1991), y el reparto de la biomasa entre los órganos, durante el crecimiento (Sau *et al.*, 2010).

El trigo es uno de los cereales más importantes en México, el consumo anual nacional es de 7.5 millones de toneladas y se producen 3.5, por lo cual se requiere importar 4 millones de toneladas al año (Financiera rural, 2014). El rendimiento nacional promedio es de 5 toneladas por hectárea, y en Coahuila es de 3 toneladas por hectárea (SIAP, 2015), por lo cual se requiere establecer estrategias de manejo del cultivo para incrementar el rendimiento de este cultivo en el estado. En este contexto el modelo de simulación CERES trigo será evaluado con la información obtenida en campo y será una valiosa herramienta para simular y predecir el comportamiento del cultivo en otras localidades en el estado.

Objetivo General

Obtener los coeficientes genéticos en trigo var. Júpare C2001 y evaluar la capacidad del modelo CERES-Trigo para simular el crecimiento, rendimiento del cultivo y balance de agua en el suelo, con diferentes regímenes de riego y fechas de siembra

Objetivos Específicos

- Evaluar la capacidad del modelo CERES para simular en trigo variedad Júpare C2001 la fenología del cultivo, la producción de materia seca total aérea, en hojas, en diferentes fechas de siembra.
- Evaluar la capacidad del modelo CERES para simular rendimiento de grano, peso de grano, número de granos por espiga y por m^2 .
- Evaluar la capacidad del modelo CERES para simular en el trigo variedad Júpare C2001, el contenido de agua en el suelo durante el ciclo del cultivo.

Hipótesis

- El modelo CERES - Trigo simula aceptablemente el crecimiento, rendimiento y balance de agua en el suelo del cultivo trigo var. Júpare C2001, considerando condiciones diferentes de manejo de riego y fechas de siembra.

REVISIÓN DE LITERATURA

Modelo

Modelo es una representación simplificada de la realidad (Teh, 2006) que tiene cierto grado de precisión de la forma más completa posible (Hernández, 2009), consiste en estudiar la interacción de un conjunto de variables interdependientes entre sí, que en su conjunto conllevan a solucionar un problema o la obtención de un resultado (Dhungana *et al.*, 2006). Un modelo de cultivo es un sistema de ecuaciones que describen la dinámica del sistema cultivo-suelo y es útil para dar respuesta de interés en función de variables explicativas (Haefner, 2005).

Simulación

Simulación es una técnica numérica que es utilizada para realizar experimentos en una computadora digital a través del comportamiento matemático en la lógica de sistemas (Sánchez, 2008; Villanueva, 2009). La simulación digital es una técnica en donde se utiliza un ordenador para simular (imitar) el comportamiento real o hipotético, con el objetivo de analizar, estudiar y mejorar el comportamiento dinámico de interés, en la realización de experimentos (Singh *et al.*, 2008). En diversas situaciones, el proceso de simular permite analizar el sistema y dar un enfoque innovador para elegir el mejor resultado (Sánchez, 2008).

Sistema

Una característica de la tecnología moderna es la búsqueda constante y creciente de la especialización con una inmensa cantidad de datos, sobresaliendo el concepto de sistema como un conjunto de elementos interrelacionados entre sí que funcionan con un mismo objetivo al representar situaciones reales, con el propósito de estudiar, describir y predecir la influencia de diversos factores endógenos (controlables por el productor) y exógenos (clima). Un sistema puede ser abierto o cerrado, en el abierto no se ejerce

ningún control sobre su propia acción y en los segundos, el comportamiento pasado afecta el comportamiento actual del sistema, por ejemplo los sistemas biológicos que habitualmente son representados por modelos dinámicos (Singh *et al.*, 2008; Villanueva, 2009). Actualmente el aumento del conocimiento de los sistemas agrícolas ha conducido al desarrollo de los modelos de simulación convirtiéndolos en una pieza fundamental de la investigación (Villalobos, 2009). El análisis de sistemas es la aplicación de un conjunto de técnicas y teorías interconectadas en un marco matemático (análisis cuantitativo), orientadas al estudio y planificación para dar solución a problemas de manejo, administración y decisión, al suministrar un marco de trabajo en el que se lleva a cabo una investigación para entender el funcionamiento del sistema y de sus componentes, por ejemplo en un sistema de cultivo los componentes serían el suelo, factores meteorológicos, especie, cultivar y prácticas de cultivo (Saú *et al.*, 2010), la esencia del análisis de sistemas es la flexibilidad y la universalidad de su enfoque (Grant y Swannack., 2008; Sánchez, 2008).

Modelos de simulación

La agricultura permite al hombre producir alimentos, pero también esta actividad se caracteriza por la incertidumbre de los factores que intervienen en el “sistema cultivo”, para ello, los modelos de simulación representan una herramienta de apoyo muy importante (Villalobos *et al.*, 2009; Soddu *et al.*, 2013). Es menos costoso el uso de la simulación, que la realización de las actividades en la vida real (Arora *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2010). Los modelos de simulación, son un programa que facilita describir a través de fórmulas matemáticas los diversos procesos, interacciones y mecanismos que ocurren dentro de un sistema (Sánchez, 2008; Boote *et al.*, 2010). La simulación del crecimiento de un cultivo es cualquier algoritmo que intenta describir de manera cuantitativa la respuesta del sistema de cultivo a su entorno (Amor *et al.*, 2001; Sau *et al.*, 2010), los modelos de crecimiento de cultivos integran los efectos del suelo, clima, manejo, genética y plagas en el crecimiento diario, pudiendo utilizarse para tener una perspectiva de los posibles rendimientos

(Boote *et al.*, 2010; Soddu *et al.*, 2013), pueden ser utilizados para evaluar los cambios en las estrategias de manejo en la eficiencia biológica de los sistemas de producción (Villanueva, 2009; Valizadeh *et al.*, 2014).

Tipos de modelos

En los últimos años los modelos han representado un componente integral de la ciencia con una amplia variedad de usos en muchos aspectos agrícolas que van desde la programación del riego a la identificación de los componentes del crecimiento de las plantas (como la respiración), el interés por el modelado ha generado muchos beneficios al proporcionar una manera de integrar conceptos en diferentes ramas de la ciencia (Jonhson, 2016). En la actualidad existen diversos tipos de modelos, que simulan procesos en detalle con el objetivo de que puedan ser utilizados en un amplio rango de ambientes (Guevara, 2007), entre los que podemos citar a los:

Modelos mecanísticos

Modelos matemáticos

Modelos estáticos

Modelos estocásticos

Modelos determinísticos,

Modelos dinámicos

Modelos empíricos

Modelos mecanísticos

Se basan en ecuaciones que han sido desarrolladas para describir matemáticamente los procesos o mecanismos que dan lugar al fenómeno como parte del sistema (Johnson, 2016). Son modelos de crecimiento que describen las relaciones e imitan los procesos físicos, químicos y biológicos para dar respuesta al analista, basados en el conocimiento del proceso del fenómeno de estudio, para explicar la causa y efecto de las variables (Teh, 2006). Comúnmente se utilizan con fines de investigación, para representar la respuesta de un cultivo en procesos como la fotosíntesis, respiración,

transpiración, crecimiento, partición del rendimiento en las partes de la planta debido a factores como el medio ambiente (Vandendriessche *et al.*, 1995). Como modelo de crecimiento estima la producción potencial y con limitación de agua y/o nutrientes (nitrógeno), así también, el comportamiento del cultivo desde la emergencia a la cosecha en determinadas circunstancias (Vandendriessche *et al.*, 1995). Los modelos mecanicistas son muy útiles para decidir la mejor opción que conlleve a optimizar el crecimiento y rendimiento del cultivo (Singh *et al.*, 2008).

Sub modelo semi- empírico

Cuando los modelos mecanísticos son construídos a partir de las descripciones de procesos involucrados en el sistema, frecuentemente empíricas, operan entre dos o tres niveles de interrelación, como por ejemplo, la fotosíntesis total del dosel que puede ser definida con una ecuación que describa la fotosíntesis de una sola hoja con la respuesta de esta a la luz y también con otra ecuación que describa la atenuación de la luz a través del dosel o el rendimiento del grano con respecto a las lluvias, es decir, tienen una interpretación biofísica (Rezzoug *et al.*, 2008), pero no pueden ser fundados en mecanismos detallados, como los modelos mecanicistas que representan más complejidad, y descripción de estos procesos (Johnson, 2016).

Por lo anterior se destaca que la modelación científica es útil para representar la fisiología de los cultivos en detalle y la respuesta de éste a cambios ambientales, es decir, a determinadas condiciones lugar y tiempo (Fernández, 2013; Glotter *et al.*, 2014), y mejorar el conocimiento de la investigación científica a través de la integración y síntesis de la fisiología, genética, fertilidad del suelo, contenido de agua en el suelo, tratamientos y ecología (Boote *et al.*, 2010).

Aplicación en la agricultura

A mediados de la década de los años 60's surge el concepto de "sistema dinámico", dónde aparece la variable tiempo que favorecía la representación de

las interacciones y el comportamiento. Durante los 70's se formaliza el concepto de sistema dinámico, los primeros modelos de simulación fueron modelos de cereales desarrollados en los E.U., y en los años 80's se produjo un gran avance en la modelización de distintas especies (Villalobos, 2009; Boote *et al.*, 2010). La idea de modelos de crecimiento de los cultivos surge por la necesidad de integrar los conocimientos del suelo, clima y prácticas agrícolas de manejo para ser utilizados como una herramienta de apoyo en la toma de decisiones para transferir tecnología agrícola de una localidad a otra (con diferente suelo y clima), con la idea de aplicarla y ajustarla a la práctica agrícola en la búsqueda del uso eficiente de los recursos, como el agua de riego y fertilización (Singh *et al.*, 2008; Boote *et al.*, 2010).

Los modelos de simulación específicos para diferentes cultivos, se encuentran integrados en sistemas computacionales, los más comunes son: DSSAT (Decisión Support System for Agrotechnology Transfer) (Jones *et al.*, 2003); EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) (Williams *et al.*, 1990); SWAT (Soil & Water Assessment Tool) (Arnold *et al.*, 1991); CropSyst (Cropping Systems Simulation Model) (Stockle y Nelson, 1994); APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) (McCown *et al.*, 1996).

Descripción y uso del DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)

En 1982 el IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer), "Red Internacional de sitios para la Transferencia de Agrotecnología" propuso la utilización de sistemas y simulaciones para evaluar nuevas tecnologías agrícolas, y facilitar la toma de decisiones de los agricultores (Uehara y Tsuji., 1998). Las investigaciones del proyecto tenían los siguientes objetivos: 1) Proveer de escenarios para la toma de decisiones, capaces de simular los riesgos y las consecuencias de una decisión. 2) Cantidad mínima de datos para realizar simulaciones. 3) Que las simulaciones fueran aplicadas en la agricultura mundial, para simular el rendimiento de un lugar en específico (Jones *et al.*, 2003).

El proyecto estaba integrado por un equipo internacional e interdisciplinario de científicos de más de 25 países, que incluía al sistema computacional DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) “ Sistema de Apoyo para las decisiones de transferencia agrotecnológica” (Uehara y Tsuji, 1998).

Al inicio el alcance para la simulación fue limitado, se consideró a los cultivos más importantes para la seguridad alimentaria, y se agruparon en cereales (maíz, sorgo, arroz y trigo) (Guevara, 2007), legumbres (frijol, cacahuate, soya) y tubérculos (yuca, papa) (Uehara y Tsuji, 1998; Amor *et al.*, 2001), con el objetivo de identificar el genotipo a través de las interacciones suelo-planta-atmósfera y ser utilizado en situaciones biofísicas (Rezzoug *et al.*, 2008; Boote *et al.*, 2010). Los modelos de cultivo que se incluyen en este paquete facilitan la aplicación y evaluación en diversas actividades y se utilizan para resolver todo tipo de problemas agronómicos (Sau *et al.*, 2010; Peña, 2011). Debido a la incorporación de nuevos avances científicos, el programa se ha ido rediseñando y programando, por lo que se han actualizado versiones y ha sido distribuido bajo la protección de ICASA (International Consortium for Agricultural System Application) (www.ICASAnet.org) característica que sitúa al DSSAT como uno de los más utilizados, al incluir los modelos de simulación más exitosos y con los más altos estándares en modelización de cultivos (Hoogenboom *et al.*, 2010; Sau *et al.*, 2010; Lizaso *et al.*, 2011).

La estructura del sistema DSSAT facilita el intercambio de información entre sus componentes, lo que permite comprender la función de cada uno en un marco de investigación, con el objetivo de poder realizar una predicción en determinadas condiciones y adecuar la experimentación en el mundo real, ahorrando tiempo y recursos humanos a partir de la investigación agronómica (Jones *et al.*, 2003; Singh *et al.*, 2008). La versión DSSAT v4.5 tiene incorporados 28 modelos de cultivos diferentes, contiene herramientas que facilitan la creación y gestión experimental en lo referente al suelo y el clima, el secuestro de carbono en el suelo y el manejo de precisión (Hoogenboom *et al.*, 2010; Fernández, 2013). El modelo simula el crecimiento y desarrollo de la planta día a día hasta el final de su ciclo productivo basándose en procesos

fisiológicos, simula los efectos del clima, genotipo, propiedades del suelo, manejo, acumulación de biomasa, rendimientos, dinámica del contenido de nitrógeno y de agua en el suelo sobre la planta (De San Celedonio *et al.*, 2014; Andarzian *et al.*, 2015).

El módulo principal tiene 6 fases (Figura 1), la iniciación incluye los datos de entrada y el comienzo del ciclo (estación) la tasa de cálculos, integración, datos de salida y resumen, estos controlan principalmente la realización de tareas que se le pida al programa (Jones *et al.*, 2003).

DSSAT es una colección de programas independientes que operan juntos y que tienen como centro la simulación de cultivos para estimar la producción apoyándose en el módulo planta (Figura 1), dónde el genotipo es utilizado para describir el comportamiento del cultivo en determinadas condiciones, (Hoogenboom *et al.*, 2010). Con el software el usuario prepara bases de datos de entrada, como el clima dónde el modelo requiere radiación solar diaria ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), temperatura máxima y mínima ($^{\circ}\text{C}$), precipitación (mm), humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s o km/día), la duración del día (horas), latitud. La información de propiedades físicas y químicas del suelo, el pH, drenaje, coeficiente de escorrentía, evaporación (mm), conductividad hidráulica ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$), densidad ($\text{g} \cdot \text{cm}^3$), características de cada capa de suelo para los cálculos de incrementos de profundidad de la raíz y el contenido de agua en el suelo desde el primer día de la simulación (Rezzoug *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 2008).

Descripción del modelo CERES-Trigo

El modelo CERES-Trigo fue diseñado por la necesidad de calcular la acumulación y partición de biomasa en las diferentes etapas del cultivo y analizar el desarrollo fenológico y la influencia del genotipo, el clima, disponibilidad de agua y nitrógeno en el suelo, y su repercusión en la transformación y partición de biomasa en diversas partes de la planta, con el objetivo de lograr simular los efectos del medio ambiente en el crecimiento de los cultivos (Godwin *et al.*, 1989). El rendimiento y fenología se desarrollaron

para ser de utilidad en la predicción (a nivel local y regional, en invierno o primavera), explicar el comportamiento del cultivo y mediante la evaluación de riesgos encontrar posibles estrategias ante factores que afecten el rendimiento de este cultivo (Hodges y Ritchie, 1991).

El modelo requiere información de los coeficientes genéticos del cultivo relacionada con la sensibilidad al fotoperiodo, duración del llenado del grano, la conversión de masa en número de granos, tasa de llenado del grano, requerimiento de vernalización y la resistencia al frío (Singh *et al.*, 2008), además de información sobre el manejo del cultivo como fecha de siembra, profundidad, población de plantas. En la modalidad de riego se debe especificar las fechas y cantidad de aplicación (mm). Con la información proporcionada, el modelo simula diariamente el desarrollo fenológico, partición y acumulación de biomasa (kg ha^{-1}), índice de área foliar, balance de agua (mm), contenido de nitrógeno entre el suelo y la planta desde la fecha de siembra hasta la etapa de madurez fisiológica para uno o varios ciclos (Rezzoug *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 2008), para posteriormente efectuar la comparación de los datos observados con los simulados y para darle mayor confianza al usuario en la utilización de los modelos para evaluar los riesgos en el manejo del cultivo en diversos escenarios (Jones *et al.*, 2003; Arora *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2010; Glotter *et al.*, 2014).

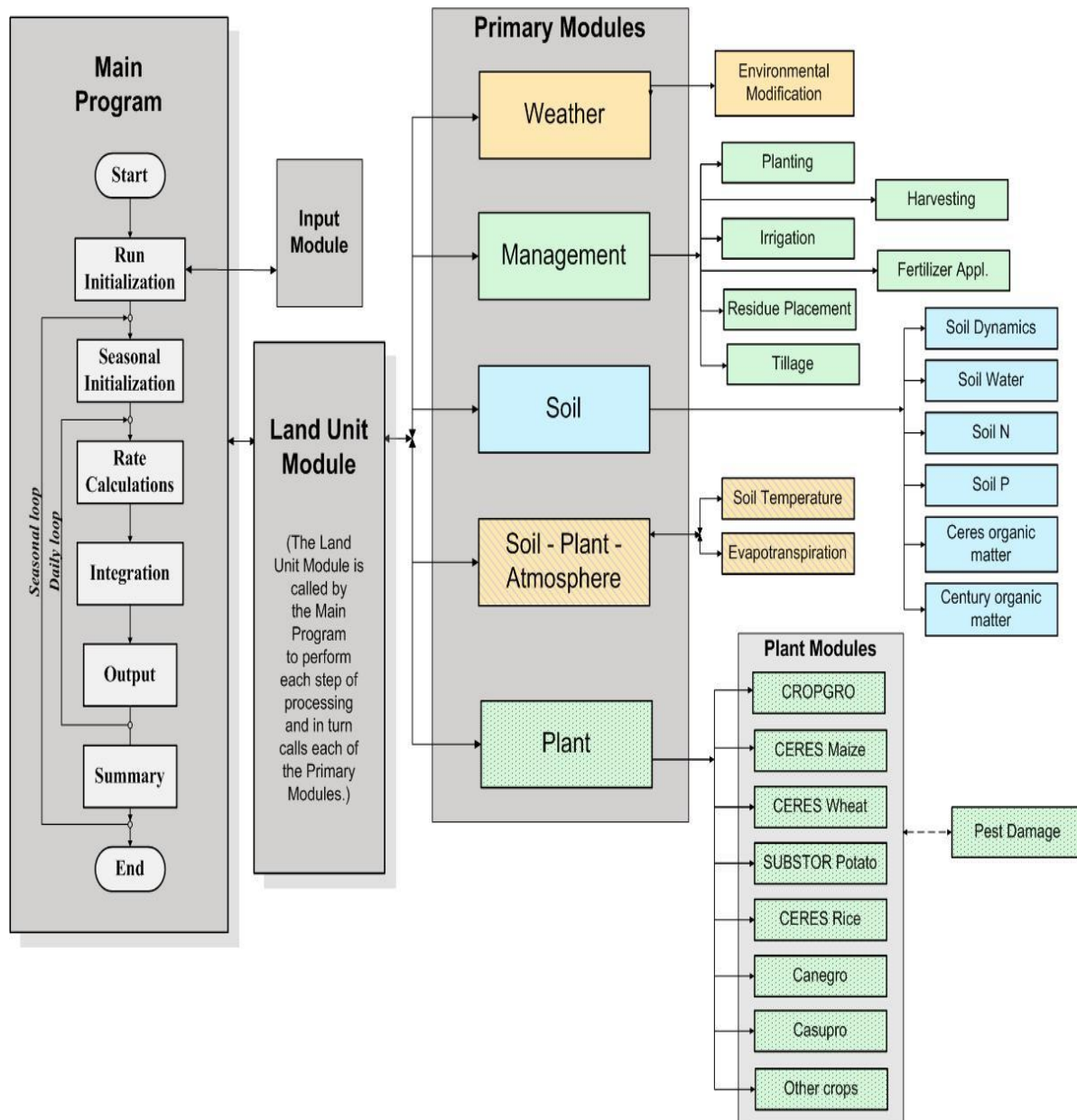


Figura 1. Representación esquemática de los archivos de entrada y salida usados por los modelos de cultivos de DSSAT v4.5 (Hoogenboom et al., 2010).

Estructura de los módulos y sub módulos de DSSAT

El programa DSSAT-CSM simula el crecimiento, desarrollo y rendimiento de un cultivo que crece en un área determinada y bajo ciertas condiciones de manejo, dentro del marco del sistema - cultivo en el tiempo, los principales componentes del sistema están organizados por módulos primarios que describen el clima, suelo, características de la planta, manejo del cultivo, condiciones experimentales integrando los componentes de la relación suelo-planta-atmósfera, para describir las respuestas de las plantas a condiciones climáticas y de manejo y sub módulos relacionados específicamente a la condición de manejo del cultivo (Singh *et al.*, 2008; Boote *et al.*, 2010).

Módulo de clima

La función principal es leer o generar parámetros diarios y ajustarlos de acuerdo a los valores utilizados por el modelo (Hoogenboom *et al.*, 2010), de ser necesario este módulo calcula el tiempo diario en horas, la temperatura máxima y mínima, radiación solar, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento (Singh *et al.*, 2008) en este sub módulo es posible realizar modificaciones ambientales diariamente para estudiar el cambio climático mediante la simulación de experimentos (Jones *et al.*, 2003; Dhungana *et al.*, 2006).

Módulo de suelo

Como unidad de terreno es representada como un perfil unidimensional, homogéneo horizontalmente, compuesto por una serie de capas de suelo verticales. En este módulo se integran los sub-módulos de agua, temperatura, carbono, nitrógeno, fósforo y dinámica del suelo (Jones *et al.*, 2003).

Sub módulo dinámica del suelo

Diseñado para leer y calcular las características de la estructura del suelo por capas y las modificaciones en las propiedades del suelo en respuesta a la labranza, este módulo lee valores a partir de un archivo (Hoogenboom *et al.*, 2010).

Sub módulo agua del suelo

Calcula procesos del agua en el suelo, acumulación de nieve, escorrentía, infiltración de la lluvia y riego, drenaje, saturación hídrica, flujo no saturado, profundidad del agua, evaporación del suelo y los procesos de captación de agua por la raíz, , los cálculos sobre el contenido de agua se actualizan a diario para cada capa del suelo (Hoogenboom *et al.*, 2010), además este sub módulo tiene el enfoque para calcular el escurrimiento de la capa superior utilizando límites en los parámetros del drenaje y el flujo no saturado estimando de manera conservadora la difusividad del agua en el suelo y las diferencias volumétricas del contenido del agua en las capas adyacentes (Jones *et al.*, 2003).

Sub módulo balance de carbono y nitrógeno en el suelo

Calcula las concentraciones de carbono y nitrógeno en el suelo, incluye la fertilización orgánica e inorgánica y el flujo de nutrientes entre las capas del suelo (Hoogenboom *et al.*, 2010). Este módulo considera las propiedades del suelo, los cálculos en los sub módulos de agua y temperatura en el suelo, pues el transporte de N del suelo a las capas más profundas es basado en el flujo de agua (Jones *et al.*, 2003). El modelo calcula las cantidades de nitrógeno en el grano y en las partes vegetativas de la planta y también calcula un índice de estrés de nitrógeno (Guevara, 2007).

Sub módulo temperatura del suelo

El modelo se basa a partir de la temperatura del aire para determinar las condiciones de temperatura en las diferentes capas del suelo y para calcular la temperatura promedio anual del aire y la amplitud de las temperaturas medias mensuales. Además se incluye el enfoque para calcular el impacto de la radiación solar, la temperatura del albedo en la superficie del suelo, la descomposición de materia orgánica en el suelo “SOM” (Soil Organic Matter) y la modificación en procesos de la planta como la emergencia (Jones *et al.*, 2003).

Módulo de suelo – planta – atmósfera

Este módulo aporta el cálculo diario de la intercepción de luz por el dosel, la evapotranspiración (ET) potencial, el contenido de agua por capa de suelo y sus propiedades (Jones *et al.*, 2003). Resuelve la competencia en el sistema por los recursos suelo-planta-atmósfera “SPAM” (Soil Plant Atmosphere), al calcular la partición y procesos de balance de energía, la evaporación del suelo, transpiración de las plantas y la extracción de agua de la raíz en cada capa de suelo (Hoogenboom *et al.*, 2010).

Módulo crecimiento individual de la planta

Diseñado para el enlazar módulos que describen el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos individuales (Jones *et al.*, 2003), cada módulo por separado simula la fenología, el crecimiento, senescencia, la partición, la demanda de carbono y nitrógeno por parte de la planta (Hoogenboom *et al.*, 2010). Calcula diariamente la acumulación de materia seca, el índice de área foliar, número de hojas por planta y la profundidad radicular (Guevara, 2007).

Módulo de manejo

El módulo de manejo es determinado por operaciones de los sub módulos como siembra, cosecha, riegos, fertilización y aplicación de residuos, el usuario especifica las operaciones en el archivo experimental de entrada, las cuales pueden ser automáticas o fijas, basadas en fechas de entrada o días después de la siembra (Jones *et al.*, 2003).

Información requerida para operar DSSAT

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; Dhungana *et al.*, 2006; Andarzian *et al.*, 2015).

Los archivos para el modelo CERES – Trigo se encuentran organizados en cuatro tipos de archivos como datos de entrada y salida (Figura 2):

1. El primer tipo de archivo tiene información que identifica a los datos experimentales (EXP.DIR) y datos meteorológicos (WTH.DIR).
2. Un segundo grupo de archivos proporciona datos de entrada para los coeficientes de cultivo, el clima, el suelo y la información de gestión para todos los tratamientos de un experimento (ARCHIVO 1, ARCHIVO 2,..., file 0).
3. El tercero contiene datos de campo para la comparación con los resultados simulados para todos los tratamientos experimentales (FILE A, FILE T).
4. El cuarto archivo contiene los resultados de salida (Ritchie y Godwin., 1991).

Los archivos de entrada son parámetros del suelo, coeficientes genéticos y clima, con su utilización permiten al usuario organizar de una manera sencilla la información para seleccionar su experimento y los tratamientos del experimento de simulación en la comparación de los datos simulados con los observados y permitir al usuario optar por modificar condiciones de tratamiento para evaluar, “que pasaría si”: se tuviera diferente variedad, clima, suelo, fecha de siembra y

profundidad, población de plantas, manejo del riego, distancia entre filas, y el cambio de la gestión de fertilizantes nitrogenados, variables que se pueden cambiar de forma interactiva (Ritchie y Godwin, 1991; Jones *et al.*, 2003; Dhungana *et al.*, 2006).

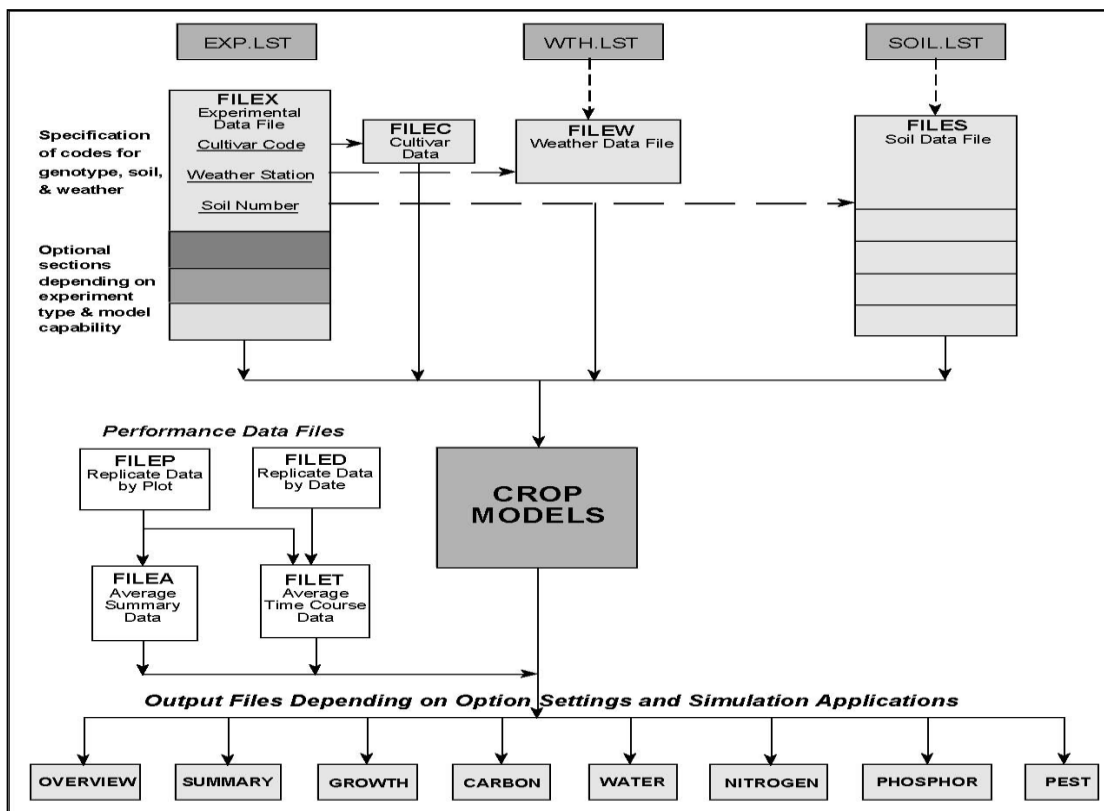


Figura 2. Representación esquemática de la estructura modular del DSSAT – CSM y los componentes v4.5 (Hoogenboom *et al.*, 2010).

Datos experimentales (FILE X):

Es necesario proporcionar información del cultivo, fechas, método, labranza, profundidad de siembra y espaciamiento entre surcos, densidad de plantas, dirección de las parcelas, fertilización, pesticidas, riegos, etapa del cultivo y fecha de cosecha, mencionar si hubo un cultivo anterior a la siembra, es indispensable realizar el análisis inicial de suelo a diferentes profundidades para proporcionarle la información requerida para este archivo sobre el contenido de arena, limo, arcilla, nutrientes, carbono orgánico y pH, contenido de humedad y densidad del suelo (Jones *et al.*, 2003)

Coeficientes Genéticos (.CUL):

Los coeficientes genéticos son parámetros que caracterizan a cada cultivar o genotipo y tienen que estimarse por el usuario a partir de datos experimentales (Jones *et al.*, 2003). En el caso de trigo hay 7 coeficientes genéticos (Cuadro 1), referentes a la duración y modificación de las fases durante el ciclo de vida del cultivo, el tamaño y la tasa de aparición de las hojas y el peso del grano (Hunt, 2006). En situaciones donde no se disponga de los coeficientes genéticos, es posible utilizar el paquete de software GENCALC (Genotype Coefficient Calculator) calculador de coeficientes genéticos, contenido dentro de DSSAT que facilita el cálculo de los coeficientes para utilizarlos como datos de entrada para que el modelo corra de manera apropiada (Hunt *et al.*, 1993).

El coeficiente P1V se expresa como GDD acumulados desde la emergencia hasta el final de la etapa juvenil y P1D es la sensibilidad fotoperiódica, establecida en días de retraso del espigamiento por cada hora de aumento del fotoperíodo por encima del valor del umbral (10 hrs), la respuesta de la planta a la vernalización y el fotoperíodo es el número de filocrones (intervalos de tiempo térmico) entre la aparición de las hojas (McMaster *et al.*, 2008). El coeficiente P5 determina la duración e incremento del llenado del grano, se expresa en GDD como la suma térmica que va desde la aparición de la espiga a la madurez fisiológica (Hodges y Ritchie, 1991; Langensiepen *et al.*, 2008; Hoogenboom *et al.*, 2010). La duración del llenado del grano depende de la variedad de cultivo utilizada en el experimento, sea de ciclo corto o largo pero el valor de aproximado de 480 GDD acumulados puede ser satisfactorio para ambos ciclos (Ritchie y Godwin, 1991).

Cuadro 1. Coeficientes genéticos DSSAT para CERES – Trigo.

Parámetro	Descripción
P1D	Coeficiente de sensibilidad al fotoperiodo (porcentaje de reducción en la tasa de desarrollo /en relación con las 10 h menor que el límite del umbral) (%) (Rango 0-150).
P1V	Coeficiente de sensibilidad a la vernalización (días con temperatura óptima necesarios para completar la vernalización) (d) (Rango 0-60 días).
P5	Tiempo térmico de la fase de llenado del grano a la madurez (GDD) (Rango 600-900).
G1	Número de granos por espiga por unidad de peso en la anthesis (#/g) (Rango 15-30).
G2	Tamaño potencial del grano en condición óptima (mg) (Rango 20 - 60).
G3	Peso seco estándar del vástago no estresado a la madurez (incluyendo grano) (g) (Rango 1 -25).
PHINT	Intervalo del filocrono (tiempo térmico entre la aparición sucesiva de las hojas) (GDD) (Rango 60 – 100).

GDD = grados día de desarrollo

(Jones *et al.*, 2003)

Los valores para los coeficientes G2 y G3 se pueden cambiar solamente si la duración de todo el ciclo de crecimiento, biomasa y rendimiento de grano son datos aproximados a los del periodo de prueba y si no hubo mucho estrés durante el ciclo de crecimiento del cultivo (Ritchie y Godwin, 1991). El valor de PHINT (filocrono) es el tiempo térmico entre las sucesivas apariciones de los ápices foliares, se determina y expresa en GDD (Hodges y Ritchie, 1991; Rezzoug *et al.*, 2008; Andarzian *et al.*, 2015), dónde la tasa de aparición de las hojas está determinada por la influencia de la longitud del día y las temperaturas (Langensiepen *et al.*, 2008), en específico la temperatura del meristemo apical y de la zona de expansión de la hoja, dónde a nivel de toda la planta, la duración de la floración es consecuencia de la aparición foliar

(McMaster *et al.*, 2008), para dar certidumbre a la simulación el usuario debe verificar que los datos de la temperatura estén dentro del rango de la realidad (Ritchie y Godwin, 1991). De los 7 coeficientes genéticos de trigo P1V, P1D y PHINT están relacionados con el desarrollo fenológico del cultivo (crecimiento, desarrollo, floración), P1V y P1D gobiernan el desarrollo de las fases del cultivo como la fecha de antesis y madurez (Ritchie y Godwin, 1991), los parámetros P5, G1, G2, G3 están relacionados con el llenado del grano (número de espigas y de espiguillas), es decir, los componentes del rendimiento (Langensiepen *et al.*, 2008; Andarzian *et al.*, 2015), es necesaria la precisión de los parámetros para que la simulación sea exitosa (Ritchie y Godwin, 1991).

Datos del perfil de suelo (.SOIL):

La clasificación del suelo a nivel local utiliza el sistema taxonómico del USDA - NRCS (Natural Resources Conservation Service) (Jones *et al.*, 2003), se puede especificar la clasificación del suelo, propiedades, profundidad, albedo de la superficie, curva de escorrentía, número de capas y espesor de cada una, información que debe ser consistente con las condiciones iniciales (Ritchie y Godwin, 1991), pues los valores nitrato de amonio y el contenido inicial de agua se utilizarán para realizar cálculos en las profundidades y sobre el suelo, además se debe especificar las características básicas por capa del perfil del suelo: contenido de agua (saturación, límite superior, límite inferior), coeficiente de drenaje, densidad, carbono orgánico, pH, para calcular el factor de crecimiento de la raíz (Jones *et al.*, 2003), el usuario puede capturar manualmente sus propios valores de suelo (Ritchie y Godwin, 1991). La información referente a la retención de agua por capa de suelo es necesaria para la ponderación del acomodo de las raíces en las diferentes profundidades, además de otros factores del crecimiento como pH e información adicional de la superficie como drenaje, escorrentía, evaporación de la superficie del suelo (Jones *et al.*, 2003).

Datos del Clima (.WTH):

La información climática de datos observados representa un insumo de DSSAT para reproducir los rendimientos en los datos de salida (Glotter *et al.*, 2014), los datos meteorológicos diarios correspondientes a la temporada de crecimiento (a partir de los días de siembra hasta después de la madurez del cultivo) deben de estar disponibles en un archivo, además si el archivo contiene datos meteorológicos de antes de la siembra, la simulación de los procesos del suelo puede comenzar antes de la siembra, cuando se dispone de información climática adicional, el usuario puede seleccionar fechas de siembra alternativas o variedades de duración más larga para analizar la sensibilidad del modelo (Ritchie y Godwin, 1991). Es necesario la identificación del código del instituto, enumeración de estación meteorológica, latitud y la información que debe contener el archivo es temperatura mínima y máxima (°C), radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), lluvias (mm), velocidad del viento (m/s o km/día), horas de sol (hrs) y humedad relativa (%) (Ritchie y Godwin, 1991; Boote *et al.*, 2010). Los datos meteorológicos diarios abarcan registros relevantes para el cultivo como la incidencia total de la radiación solar en la parte superior del follaje y de la temperatura y precipitación por encima de la cosecha (Jones *et al.*, 2003).

Valores medios de los datos observados (.ccA)

Los datos experimentales de los cultivos pueden ser diferentes en cada tratamiento del experimento, el archivo A contiene datos de campo del cultivo (Cuadro 2), medidos como una media de las repeticiones para cada tratamiento, estos datos de campo son necesarios para la lista de datos de salida de los datos simulados con los observados (Ritchie y Godwin, 1991), los datos del archivo A corresponden a información del final del ciclo como el rendimiento promedio obtenido en la cosecha (Hunt, 2006).

Datos promedio observados en las fechas de muestreo (.ccT)

Los valores de las variables del archivo T corresponden a datos de los tratamientos durante el crecimiento del cultivo (Cuadro 3) (Hunt, 2006).

Cuadro 2. Datos experimentales requeridos por el archivo A.

Variable	Descripción
TRNO	Número de tratamiento
HWAM	Rendimiento de grano a madurez (kg ha ⁻¹)
HWUM	Peso seco de cada unidad cosechada (g)
H#AM	Número de granos por metro cuadrado a madurez (# m ²)
H#UM	Número de granos cosechados por unidad de planta a la madurez
LAIX	Máximo índice de área foliar
CWAM	Peso seco de la biomasa aérea (hojas + tallos + granos) (kg ha ⁻¹)
BWAH	Peso seco del rastrojo (tallos + hojas) en (kg ha ⁻¹)
ADAT	Fecha de antesis (día juliano)
MDAT	Fecha de madurez fisiológica (día juliano)
HIAD	Índice de cosecha

Cuadro 3. Datos experimentales requeridos por el archivo T.

Requeridos	Descripción
TRNO	Número de tratamiento
DATE	Fecha (día juliano)
LAID	Índice de área foliar
SWAD	Peso seco del tallo (kg ha ⁻¹)
GWAD	Peso seco del grano (kg ha ⁻¹)
LWAD	Peso seco de la hoja (kg ha ⁻¹)
CWAD	Peso seco de la biomasa aérea (kg ha ⁻¹)
T#AD	Número de tallos (# m ²)
SWTD	Contenido de humedad en el perfil (mm)
HWUD	Peso de un grano (grs)

Datos requeridos para calibrar DSSAT

El software tiene la aplicación para representar diferentes situaciones y facilitar al usuario la comparación de las bases de datos de ahí la confiabilidad de las observaciones, no hay un procedimiento automatizado para la calibración, los cambios deben hacerse de forma manual por el usuario (Thorp *et al.*, 2008).

La calibración implica la caracterización genotípica del cultivar a través de los coeficientes genéticos, el cálculo y medición estos coeficientes se realizan sin limitación hídrica y/o nutricional, la información como la fecha de madurez y anthesis, biomasa a la madurez, peso de granos, número de granos por m² y por espiga se determinan cuando el manejo es en condición óptima se puede considerar la variabilidad climática (distintas fechas de siembra) con el objetivo de conocer el comportamiento del cultivo en un amplio rango de escenarios (Langensiepen *et al.*, 2008),

El procedimiento de calibración del modelo CERES consiste en ajustar los parámetros genéticos para minimizar la diferencia de los valores medidos con los simulados (Thorp *et al.*, 2008), los coeficientes genéticos influyen en la aparición de las etapas de desarrollo, mediante la manipulación de estos, se puede encontrar las fechas en las cuales se presentaron los eventos fenológicos como la expansión del área foliar, producción de biomasa (rendimiento del grano y los componentes de la planta) (Arora *et al.*, 2007; Rezzoug *et al.*, 2008), además también se ajustan los parámetros de “ecotipo” y “especie” aunque la mayoría de la literatura se ha centrado solamente en determinar los coeficientes genéticos (Andarzian *et al.*, 2015). En la calibración es necesario incluir experimentos con limitación en diferentes niveles, para tener mediciones con mayor grado de detalle de la distribución de las raíces, contenido de humedad y nitrógeno en el perfil del suelo durante todo el ciclo del cultivo (Guevara, 2007).

Evaluación y validación del modelo

Es esencial el registro de información necesaria para la operación del modelo en especial la información de campo para los aspectos que se vayan a validar, con datos experimentales que permitan evaluar al modelo en un amplio rango de ambientes (Barbieri *et al.*, 2008).

Para la evaluación del modelo se considera la comparación de los datos de salida de lo anteriormente calibrado frente a los datos reales, para determinar la exactitud y precisión de la simulación en conveniencia del propósito previsto, para conocer las bondades del uso de esta herramienta de simulación al cuantificar la diferencia de los valores medidos y simulados (Valizadeh *et al.*, 2014).

Los valores de las simulaciones calculados por el modelo y los datos observados en campo (acumulación de biomasa, peso de granos, número de granos por espiga y por m²) en el tratamiento control y en los tratamientos óptimos se utilizan para probar la capacidad predictiva del modelo, la validez de las simulaciones se miden con el coeficiente de determinación (r^2), comparando los datos medidos contra los simulados. El error relativo medio cuadrado (RMSE) se utiliza para resumir la diferencia de medias (Langensiepen *et al.*, 2008).

Simulación en cereales

El modelo CERES ha sido probado en una amplia gama de entornos alrededor del mundo (Arora *et al.*, 2007; Rezzoug *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 2008; Palosuo, *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2013; Valizadeh *et al.*, 2014; Andarzian *et al.*, 2015).

En la Universidad Agrícola Punjab, Ludhiana, India, se utilizó el modelo CERES v4. se evaluó la respuesta del rendimiento al entorno con limitación de agua y regímenes de fertilización nitrogenada. Con datos de 5 ciclos del cultivo comprendidos entre los años 2000-2005, el tamaño de las parcelas fue de 10 x 20m con surcos de 0.20m y una densidad de siembra de 100 kg ha⁻¹. Los datos medidos con los simulados mostraron coherencia en las diversas condiciones

de los tratamientos, estuvieron muy relacionados en los días en que se presentaron las etapas fenológicas, acumulación de biomasa y el rendimiento, en este último se encontró una disminución en el rendimiento potencial de 5.9 ton ha⁻¹ en 2000-2001 a 4.7 ton ha⁻¹ en 2004-2005 (Arora *et al.*, 2007).

En el Departamento de Ciencias Biológicas y Agrícolas, de la Universidad Ibn Khaldoun, en Tiaret, Algeria se realizó la siembra de nueve cultivares de trigo en el mes de diciembre durante los años 2001, 2002 y 2003 con el objetivo de encontrar los coeficientes genéticos con la utilización del software DSSAT. El modelo dio buenas predicciones de desarrollo del cultivo y rendimiento del grano para las diferentes variedades (Rezzoug *et al.*, 2008).

En el Instituto de Investigación Agrícola en Nueva Dehli, India, con información de los años 2000-2001, se validó el modelo CERES para predecir el crecimiento y rendimiento del trigo bajo diferentes condiciones de riego (4, 3 y 2 riegos durante el establecimiento del cultivo) y fertilización nitrogenada (0, 60, 90, 120 y 150 N), considerando óptimo el tratamiento del régimen de 4 riegos con fertilización de 150 kg ha⁻¹ de N. Las estimaciones en las fechas de emergencia, floración y madurez fueron satisfactorias, en lo correspondiente al rendimiento la predicción general también fue satisfactoria con un R² de 0.88 (Singh *et al.*, 2008).

En el noreste, centro y sur de Europa, se realizó una investigación con la utilización de 8 modelos aplicables a trigo, del ciclo otoño-invierno. Dentro de los modelos utilizados se encontró al paquete DSSAT, el cual fue de los que presentó el mejor desempeño para estimar el rendimiento al presentar los RMSE más bajos y uno de los índices de concordancia más altos en comparación con los demás. En términos generales se encontró que los modelos difieren de los algoritmos que aplican, por lo tanto, no se puede asegurar que uno sea mejor que otro. Los resultados demostraron que la aplicación de modelos de simulación con una calibración limitada, conduce a un alto grado de desconfianza por lo que para obtener resultados más reales, es necesario especificar características de los cultivos (Palosuo, *et al.*, 2011).

En el distrito de Chaohu, en la provincia de Anhui, de China, se realizó una investigación con el objetivo de simular el efecto de diferente fecha de siembra, densidad de población y niveles de fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de trigo de la variedad Yangmai – 13. Se utilizó el sistema DSSAT v4.0, las calibraciones se efectuaron con los datos de campo de tres años (2007-2010) y se basaron en las diferentes etapas de crecimiento, índice de área foliar y rendimiento, así como las pérdidas de nitrógeno. Se obtuvo un 0.95 de eficiencia del modelo para simular las etapas de crecimiento, 0.85 en el índice de área foliar y 0.92 en el rendimiento, indicando que los datos simulados coincidieron con los datos medidos y la capacidad del modelo de simular de manera eficiente de acuerdo a las condiciones del sitio experimental. También se encontró un incremento en el rendimiento con densidades de siembra menores (80 a 100 plantas / m²) y a fechas tempranas (mediados de octubre) y con densidades de 250 y 300 plantas/ m² fue mejor el rendimiento en las siembra del mes de noviembre. Se encontró un incremento en el rendimiento con el N aplicado en cantidades adecuadas, pero cuando es un exceso resultó en pérdidas, por lo que se debe buscar una estrategia para optimizar el usos de fertilizantes nitrogenados (Wu *et al.*, 2013).

Se utilizaron tres periodos de tiempo: 2020, 2050 y 2080 (tres posibles escenarios), para generar datos climáticos se utilizó información histórica de los años 1975-2010. Se encontró que los incrementos de temperatura provocarían el crecimiento acelerado de las etapas y una disminución de la producción (Valizadeh *et al.*, 2014).

En el sur de Khuzestan Irán, lugar caracterizado por altas temperaturas, se utilizó el modelo CERES-Trigo en la variedad Chamran, con el objetivo de encontrar la fecha de siembra más adecuada para el cultivo en la obtención de mayores rendimientos. El cultivo se sembró en 1999 a 2005 de 4 estaciones, para determinar la fecha de siembra óptima en los diferentes lugares. El ajuste entre el rendimiento simulado por el modelo y observado fue bueno, los índices obtenidos fueron RMSE con 0.58 (por día), el RMSE normalizado de 11.8%, el índice de concordancia de 0.71, r² de 0.97, encontrándose una buena simulación de rendimiento de grano.

Producción del cultivo de trigo en México

En México entre los estados de Tlaxcala y Puebla, se utilizaron las variedades de trigo cristalino Topacio C-98, Gema C-2004 y Júpare C-2001, durante el ciclo primavera-verano del año 2006, en tres diferentes localidades con una altura aproximada de 2,500 msnm, bajo la modalidad de temporal, encontrándose que el trigo macarronero de la variedad Júpare tuvo la mejor respuesta de adaptación con rendimiento entre 3 y 3.5 ton ha⁻¹, aunque cabe mencionar que estas variedades fueron generadas para las condiciones de riego (Villaseñor *et al.*, 2011).

Producción de trigo en Coahuila

En Coahuila, en el año 2015 se sembraron 7, 630 hectáreas bajo la modalidad de riego con un rendimiento promedio de 3.57 ton ha⁻¹, la mayor superficie se encuentra en el centro- norte del estado, 7, 219 has en los distritos de Acuña y Frontera y el resto en otros municipios), el municipio de Nava con 3,280 has es el que presenta mayor superficie destinada a este cultivo y con un rendimiento de 3.60 ton ha⁻¹, una de las principales variedades sembradas es la Júpare C2001 (SIAP, 2015), este rendimiento puede considerarse bajo comparado con el rendimiento obtenido en otras regiones del país bajo riego (Moreno *et al.*, 2010), por lo cual se requiere establecer estrategias de manejo para incrementar el rendimiento de este cultivo en el estado. El modelo CERES-Trigo puede ser una herramienta de gran utilidad para simular la respuesta de la variedad de trigo duro Júpare C2001 en diferentes escenarios de manejo y condiciones ambientales, por consiguiente el tiempo de desarrollo de nuevas estrategias de manejo agrícola puede ser acortado considerablemente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y descripción del experimento

La investigación se llevó a cabo en la Unidad Buenavista de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, México (Figura 7). Geográficamente se localiza entre las coordenadas $25^{\circ} 21'5''N$ y $101^{\circ}1'47''W$.

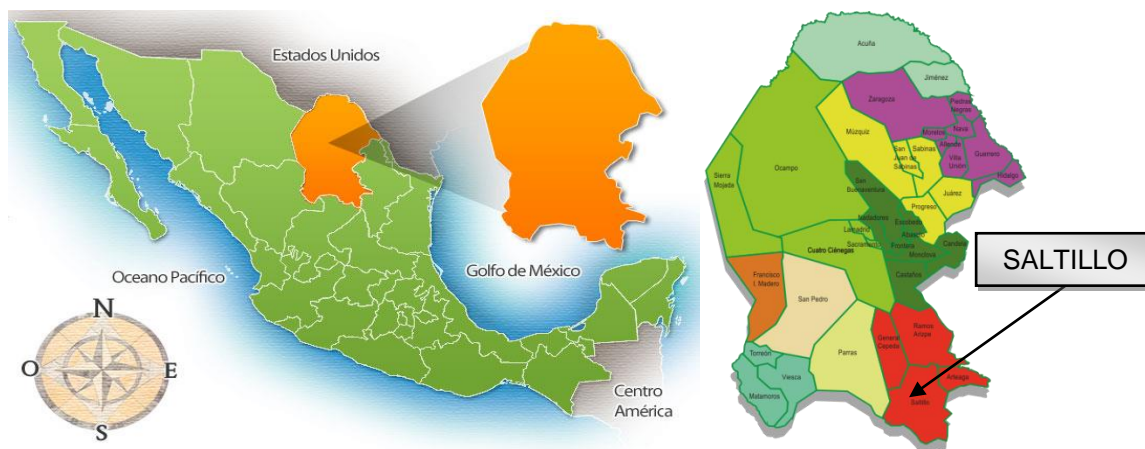


Figura 3. Localización geográfica del área de estudio.

Tratamientos y condiciones de manejo

Se evaluaron dos diferentes fechas de siembra en el ciclo invierno-primavera 2015-2016, en la primera siembra se evaluaron dos regímenes de riego y en la segunda tres (Cuadro 4).

En la primera fecha de siembra el cultivo tuvo un ciclo de 163 días para alcanzar madurez fisiológica, y en la segunda fecha de siembra el ciclo fue de 150 días. El experimento se realizó bajo el diseño de bloques al azar, con cuatro repeticiones. Cada tratamiento de riego estuvo ubicado en una parcela de 10 m de ancho y 30 m de largo, la cual se dividió en cuatro unidades experimentales o repeticiones. Se utilizó la variedad Júpare C2001, trigo duro o cristalino que es la más utilizada por los productores de la región norte del estado, se sembró en líneas separadas a 0.20 m, con una densidad de siembra de 170 kg ha^{-1} y en promedio 250 plantas m^2 emergidas. La fertilización para todos los tratamientos fue de 170-90-00, previo a la siembra se suministró la

dosis 100-90-00 (N-P-K; kg ha⁻¹) y el resto del nitrógeno en la etapa de amacollo, la aplicación se realizó manualmente, en líneas a una distancia de 0.20 m. La fuente de nitrógeno fue el sulfato de amonio granulado (20.5 % N) y del fósforo el superfosfato simple granulado (20 %).

El riego se efectuó por el método de aspersion, inicialmente a todos los tratamientos se dio un riego de presiembra de 30 mm que se complementó con un riego a la emergencia de 50 mm, posteriormente los riegos se efectuaron en las etapas fenológicas de: fase amacollo, encañe, espigado, floración y llenado del grano en la primera siembra en la segunda siembra en las fases de amacollo, encañe, espigado y floración, debido a que el ciclo se acorto y para evitar problemas de acame, que ocurrieron en las parcelas de los tratamientos 1 y 2, por lo cual en estos dos tratamientos los riegos a partir del espigamiento se debieron aplicar en varios días La cantidad total aportada durante estas fases a los diferentes tratamientos fueron T1= 650 mm, T2=459 mm, T3=380 mm , T4=323 mm y T5=245 mm.

Cuadro 4. Tratamientos y condiciones de manejo evaluados en la investigación

Tratamiento	Requerimiento de riego (%)	Fecha de siembra
1	100	18 de noviembre de 2015
2	70	18 de noviembre de 2015
3	100	15 de diciembre de 2015
4	85	15 de diciembre de 2015
5	60	15 de diciembre de 2015

Los muestreos e identificación de las etapas fenológicas se realizaron semanalmente. El área foliar se determinó tomando 5 plantas por repetición, se utilizó el método de Stickler *et al.*, (1961) y para determinar el índice de área foliar se consideró el método de Fageria y Santos (2008). Para determinar la acumulación de materia seca, se cortó 0.50 m de surco separando tallos, hojas y espigas (cuando aparecieron), se colocaron en un horno de secado a 65°C durante 48 horas, se pesaron y posteriormente se calculó la acumulación de biomasa parcial y total en kg ha⁻¹. Para determinar el contenido de humedad del

suelo se utilizó el método gravimétrico (Radulovich, 2009), a estratos de 0.20 m hasta una profundidad de 0.80 m. Para estimar el rendimiento e índice de cosecha se cortó 25 m² por repetición, se contabilizaron las espigas de cada muestra y se pesó la materia seca total, posteriormente se trilló y pesó el grano obtenido por muestra para estimar el rendimiento en kg ha⁻¹, para cada muestra se tomaron 100 granos para referencia peso y además se seleccionaron 20 espigas por repetición para contabilizar el número espiguillas y de granos por espiga y su peso, cifras requeridas por el modelo.

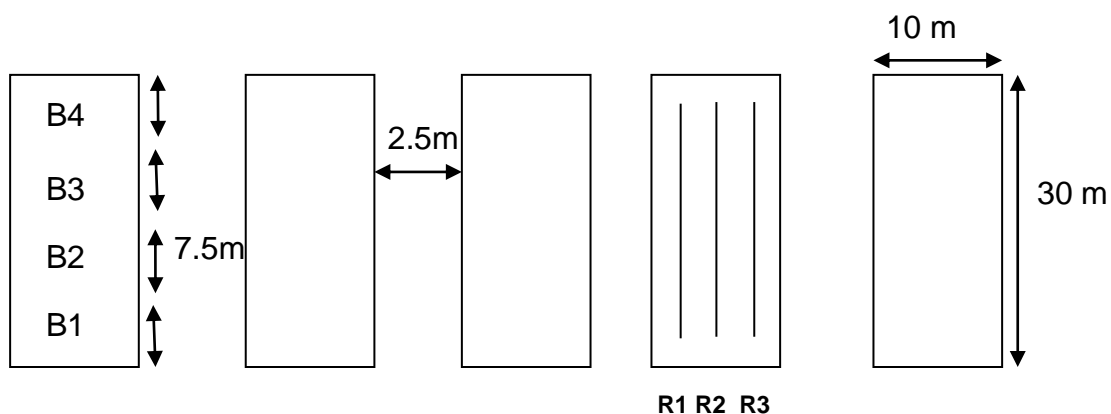


Figura 4. Representación esquemática del tamaño de las parcelas experimentales (tratamientos).

Información climática y de suelo

En la presente investigación se utilizó el DSSAT v 4.5 (Hoogenboom *et al.*, 2010), el cuál necesitó información climática (Cuadro 5) obtenida de la estación climática de la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) localizada a 350 m del área de estudio, además antes de la siembra se realizó un análisis de suelo para obtener las propiedades físico-químicas, el cuál fue realizado en el Departamento de riego y drenaje de la Universidad, la textura del suelo es franco arcilloso (Cuadro 6) y se encontró el contenido inicial de nitrógeno, fósforo y potasio de las parcelas antes de la fertilización (Cuadro 7).

Cuadro 5. Valores promedio climatológicos de noviembre 2015 a mayo 2016.

Datos/ Meses	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Rad. (MJ/m ² /día)	14.19	13.02	15.07	18.68	18.35	22.23	22.45
Max. Temp. (°C)	22.17	18.54	16.34	21.31	22.40	26.46	28.67
Min. Temp. (°C)	8.24	5.51	1.86	5.09	8.70	11.12	13.63
Lluvia (mm)	0.12	0.00	0.75	0.00	0.95	0.80	2.15
Vel. V (km/día)	227.60	271.29	213.61	213.00	259.48	265.30	350.06
Horas luz (hrs)	6.83	6.70	7.90	9.14	7.16	8.64	8.32
Evap. (mm/día)	3.32	3.79	2.86	4.82	5.23	6.28	6.02
HR (%)	62.57	53.94	54.23	42.72	49.13	50.50	60.84

Cuadro 6. Variables de las propiedades físicas y químicas del suelo requeridas por el modelo DSSAT para el sitio experimental en Saltillo, Coahuila, México.

Perfil	Materia				pH en agua	PMP* (m ³ m ⁻³)	CC* (m ³ m ⁻³)	Sat.* (m ³ m ⁻³)	Densidad aparente (g cm ⁻³)
	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	orgánica (%)					
	(cm)	(%)	(%)	(%)					
00-20	36.80	23.10	40.00	3.10	6.90	0.14	0.28	0.54	1.20
20-40	37.80	23.00	39.00	2.90	6.90	0.14	0.28	0.54	1.20
40-60	36.90	23.80	39.40	2.70	6.90	0.14	0.28	0.54	1.20
60-80	38.40	22.30	39.30	2.30	7.10	0.14	0.28	0.54	1.20

Cuadro 7. Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio del suelo correspondiente a cada tratamiento.

Tratamiento	N (%)	P (kg ha ⁻¹)	K (kg ha ⁻¹)
T1	0.095	15.08	203.62
T2	0.138	15.20	148.5
T3	0.138	30.06	491
T4	0.203	6.86	+900
T5	0.129	19.70	456

Calibración del modelo

Para calibrar el modelo es importante proporcionarle datos de campo, acumulación de materia seca (en kg ha^{-1}), índice de área foliar, cultivo, manejo del cultivo (fertilización, riegos, densidad de plantas, condiciones iniciales, método de labranza y siembra, fechas de emergencia, antesis y madurez fisiológica y cosecha (Jones *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2012; Valizadeh *et al.*, 2014).

La calibración de los coeficientes genéticos para la variedad Júpare C2001 se basó en el tratamiento en condición óptima. El primer paso fue calcular P5 en grados días de desarrollo, considerando el promedio de las temperaturas máximas y mínimas diarias y restando la temperatura base (para trigo $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Prabhakar *et al.*, 2007) de la misma manera PHINT, solamente que la suma en GDD se divide entre el máximo número de hojas que aparecieron durante la etapa vegetativa, se consideró que P1V se presenta después de la germinación y representa las temperaturas bajas que requiere la planta para comenzar a producir espiguillas y para P1D para el caso de trigo, es de día corto (Wang y Engel, 1998). Hunt *et al.*, (1993) calcularon G1 con información a la antesis en la formación de espiguillas, para los coeficientes G2 y G3 se estimaron con la información recopilada de los muestreos de la cosecha, la combinación de los parámetros se realizó mediante el método de prueba y error.

Evaluación estadística del modelo

Los resultados de la simulación fueron evaluados estadísticamente para medir la capacidad del modelo, para lo cual se calculó el coeficiente de determinación (R^2) para cada simulación (Ecuación 3) y el índice de Willmott (d) o índice de concordancia (Ecuación 2) que indica la precisión de la simulación, para el caso de estos índices cuando el valor es más cercano a 1, es mejor la relación entre las dos variables que se comparan y viceversa (Willmott, 1985), además la raíz del error cuadrado medio (RMSE) que ilustra el error de la predicción del modelo (Ecuación 1), para los datos medidos y simulados, cuanto menor sea

este valor indica que el desempeño del modelo para la simulación es mejor (Wallach, 2006) y para cuantificar las diferencias de los valores simulados y observados se utilizó el error %, conocido como diferencia porcentual (Fórmula 4), dónde un valor positivo indica el grado de sobreestimación del modelo y un valor negativo el grado de subestimación de la simulación (LeBlanc, 2004; Wu *et al.*, 2013).

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right] \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$Diferencia \% = \left(\frac{P_i - O_i}{O_i} \right) * 100 \quad (4)$$

Donde P_i y O_i son los valores simulados y observados de las variables de estudio, n es el número de observaciones y \bar{O} es la media de los valores observados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Coeficientes genéticos obtenidos de la calibración

Los coeficientes genéticos fueron calculados y calibrados para el cultivo de trigo variedad Júpare C2001 de acuerdo a Hodges y Ritchie (1991). La combinación de los parámetros genéticos con mejor ajuste en la simulación del crecimiento y rendimiento se presentan en el cuadro 8.

Cuadro 8. Valores de los coeficientes genéticos obtenidos para la variedad Júpare C2001.

Cultivar	Coeficientes genéticos						
	P1V	P1D	P5	G1	G2	G3	PHINT
Júpare C2001	0	130	466	33	23	7	100

Desarrollo fenológico

Los resultados de la simulación de la fenología del cultivo, mostraron que para los dos tratamientos de la primera fecha de siembra (T1 y T2) el modelo sobrestimó los días para alcanzar las etapas de floración en + 5 a + 8 días y la madurez en + 7 a + 11 días (Cuadro 7). En los tratamientos de la segunda fecha de siembra (T3, T4 y T5) el modelo subestimó los días a la floración y a la madurez en un rango de -2 a -12 días (Cuadro 9). Wu *et al.* (2013) obtuvieron resultados similares al evaluar el modelo en trigo en el este de China, los autores indicaron que con diferencias en estos rangos se puede considerar un buen ajuste del modelo. Dettori *et al.* (2011) reportaron diferencias de entre – 9 y + 1 días en anthesis cercanos a los valores obtenidos en esta investigación. Ottman (2008) citó la importancia de los coeficientes genéticos adecuados para disminuir el error en la simulación de la floración. Bannayan *et al.*, (2003) reportaron diferencias similares en la anthesis a las mostradas en esta investigación.

Cuadro 9. Desarrollo fenológico simulado y observado (en días después de la siembra) para los cinco tratamientos del cultivo de trigo variedad Júpare C2001.

Desarrollo fenológico	Floración (DDS)				Madurez (DDS)			
	Sim.*	Obs.*	Diferencia		Sim.	Obs.	Diferencia	
			Diferencia	(%)			Diferencia	(%)
T1	137	132	5	+ 3.8	170	163	+7	+4.29
T2	137	129	8	+6.20	170	159	+11	+6.92
T3	113	125	-12	-9.60	144	153	-9	-5.90
T4	113	123	-10	-8.1	144	150	-6	-4.00
T5	113	120	-7	-5.8	144	146	-2	-1.40

*Sim.=simulado; Obs.=observado; DDS=días después de la siembra.

Simulación del rendimiento y sus componentes a la cosecha

La simulación del rendimiento del grano y peso de grano para los tratamientos T3 y T4 mostró un buen ajuste entre valores simulados y observados, las diferencias porcentuales estuvieron dentro de un rango + 0.4 a + 7.9 % para rendimiento de grano y de 0 % a 11.53 % para peso de grano (Cuadro 10). El tratamiento T3 también tuvo un buen ajuste en el número de granos por m² (+ 4.05). Estos resultados concuerdan con los de Singh *et al.* (2008) quienes encontraron un buen ajuste en la simulación del rendimiento de trigo evaluando diferentes condiciones de manejo en riego. El modelo sobrestimó por porcentajes elevados el rendimiento de grano en los tratamientos de la primera fecha de siembra (T1 y T2) y en la segunda fecha en T5, mostrando que el modelo no tuvo la capacidad de simular las condiciones que influyeron en un menor rendimiento en condiciones reales, debido a diferente fecha de siembra o a un déficit de riego o menor disponibilidad de agua en el suelo. El modelo simula un número elevado de granos por m² que son los que determinan el rendimiento elevado en estos tratamientos. Langensiepen *et al.* (2008) en el norte de Alemania reportaron que el modelo subestima y sobrestima el rendimiento de grano en trigo, y citan que la magnitud error no permite la aplicación práctica del modelo. Lal *et al.* (1998) presentaron una situación

similar en la que CERES-Trigo sobreestima el rendimiento. Resultados similares fueron reportados por Moreno y Weiss (2004) encontraron que el modelo sobreestimó un 10 % el rendimiento, aunque subestimó el peso de un grano en un -11.45 %. Dettori *et al.* (2011) reportaron valores similares en la simulación de peso de un grano.

En la presente investigación se obtienen los mayores rendimientos en la segunda fecha de siembra. Mavromatis (2014) encontró que con la fecha de siembra adecuada es posible obtener mayores rendimientos a causa de la influencia de factores agroclimáticos y recomendó como una estrategia a la modelación regional.

Cuadro 10. Valores simulados y observados de rendimiento, peso de un grano y granos a la cosecha por m², en los 5 tratamientos del cultivo de trigo variedad Júpare C2001.

Trat.*	Rendimiento kg ha ⁻¹			Peso de un grano (mg)			Granos por m ² (kg ha ⁻¹)		
	Sim.*	Obs.*	Dif* (%)	Sim.*	Obs.*	Dif (%)	Sim.*	Obs.*	Dif (%)
T1	8759	3950	+121.74	23	18	+27.78	38081	23166	+64.38
T2	8280	4225	+95.98	23	21	+9.52	36001	18440	+95.23
T3	7221	6979	+0.40	23	23	0.00	31562	30343	+4.05
T4	7122	6600	+7.90	23	26	+11.53	31128	25062	+24.20
T5	6008	4525	-32.77	23	17	+35.29	26262	25885	+4.30

*Trat.=tratamiento; Sim.=simulado; Obs.=observado; Dif.=diferencia.

Simulación de la materia seca total

En los cinco tratamientos el índice de concordancia (d) y el coeficiente de determinación (R^2) son elevados, superiores a 0.9 observándose un buen ajuste entre valores simulados y observados en la mayor parte del ciclo del cultivo (Cuadro 11), el tratamiento T4 presenta el menor RMSE=1239 kg ha⁻¹ indicando la mejor simulación, las mayores diferencias entre valores simulados y observados se presentan al final del ciclo, como se muestra en la Figura 5, donde el modelo subestima la materia seca total en los tratamientos T1, T2, T3, y T5 (Figura 5), en los valores promedio simulados y observados T1, T2 y T3 el modelo subestima el peso de la materia seca total (Cuadro 11), y a la cosecha el modelo subestimó lo obtenido en todos los tratamientos (Cuadro 12). Langensiepen *et al.* (2008) encontraron valores de RMSE de 3.2 ton ha⁻¹, cifra mayor a la presentada en este estudio por lo que se considera que el modelo es una herramienta adecuada para la estimación de la materia seca total.

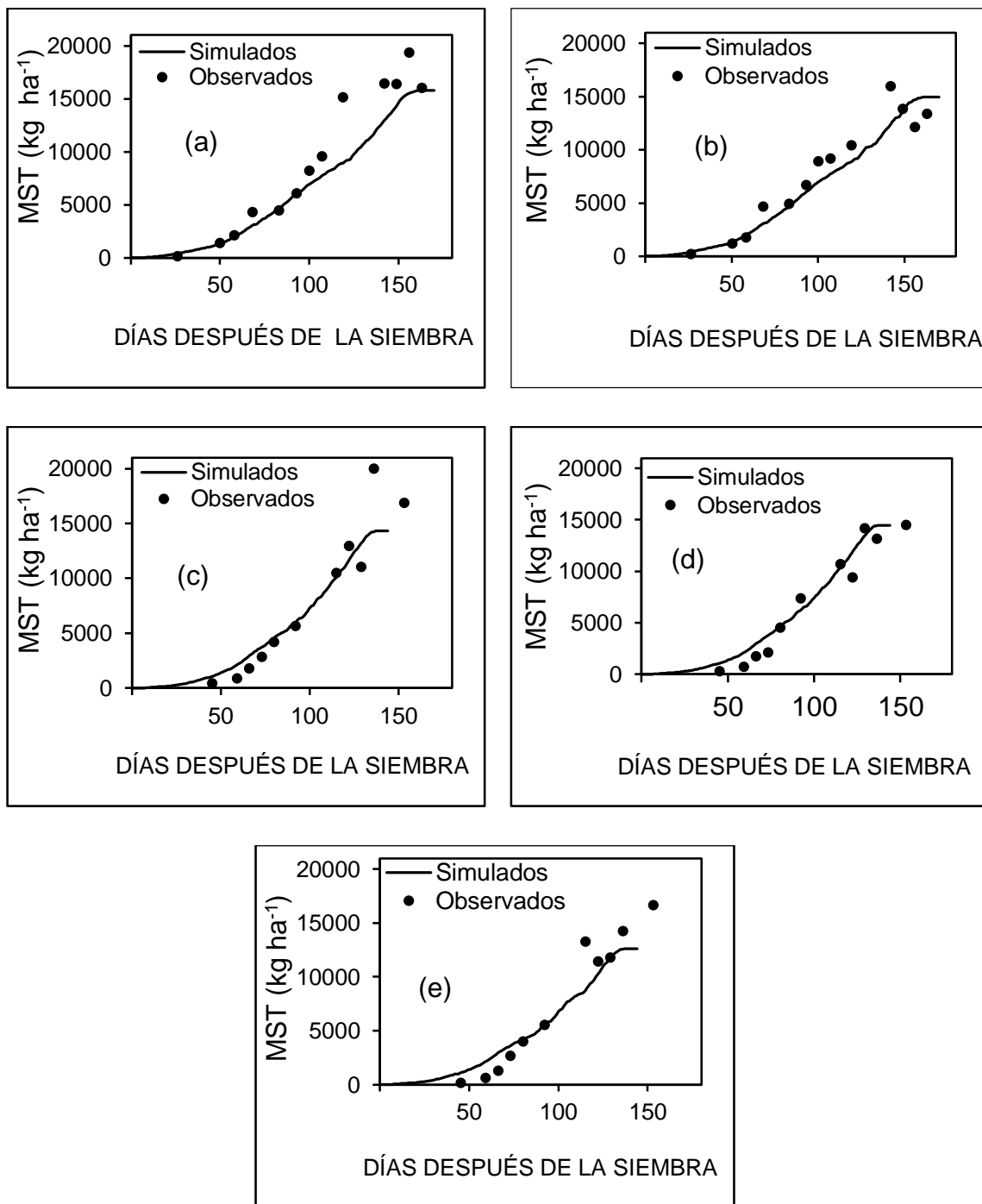


Figura 5. Materia Seca Total (MST, kg ha^{-1}) observado y simulado durante el ciclo del cultivo, calibrados en el modelo CERES-Wheat para el cultivar Júpere C2001. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).

Cuadro 11. Comparación de promedios observados y simulados durante el ciclo del cultivo en materia seca total (kg ha^{-1}), coeficiente de determinación (R^2), cuadrado medio del error (RMSE) e índice de concordancia (d).

Tratamientos	Materia seca total				
	Media observada	Media simulada	R^2	d	RMSE
T1 (a)	9225	7651	0.94	0.95	2461
T2 (b)	7994	7417	0.91	0.97	1636
T3 (c)	7076	6960	0.92	0.96	2102
T4 (d)	6462	7041	0.95	0.98	1239
T5 (e)	6524	6246	0.93	0.96	1774

Cuadro 12. Valores absolutos simulados y observados de la materia seca total a la cosecha para los cinco tratamientos.

Tratamientos	Materia seca total (kg ha^{-1})			
	Simulados	Observados	Diferencia	Relación (%)
T1	15790	21 462	-5672	- 16.00
T2	14954	14962	-8	- 0.05
T3	15071	16917	-1846	- 10.91
T4	15171	16688	-1517	- 9.09
T5	13192	14562	-1370	- 9.40

Simulación del índice de área foliar

Para índice de área foliar en T3, T4 y T5 se obtuvo el mejor ajuste de los datos simulados con los observados (Figura 6) ($R^2 > 0.81$, $d > 0.85$ y el RMSE entre 0.76 y 1.59) (Cuadro 13). En los tratamientos T1 y T2 el ajuste no fue bueno, los valores de R^2 fueron bajos (0.47 y 0.49) y los de RMSE fueron altos (2.22 y 2.29) (Cuadro 13). En el máximo índice de área foliar para los tratamientos T1, T3, T4 y T5 los valores simulados fueron muy cercanos a los observados (Cuadro 14), no así en T2 donde las diferencias son elevadas. Resultados similares a T3, T4 y T5, fueron reportados por Andarzian *et al.* (2015) que encontraron que aún con diferencias de esta magnitud la simulación es aceptable. Singh *et al.* (2008) encontraron que el modelo subestimó el índice de área foliar en -15.63% para un tratamiento en condición óptima, cifra mayor a la reportada en la presente investigación para el tratamiento óptimo (Cuadro 14).

El mejor ajuste de los tratamientos es en la segunda fecha de siembra (T3, T4 y T5) los coeficientes genéticos se obtuvieron con el tratamiento T3, en comparación con los de la primera siembra (T1 y T2), los datos indican que no se simula con precisión, aunque los datos simulado en la fenología y crecimiento del cultivo en la primera siembra son aceptables.

Wu *et al.* (2013) reportaron la obtención de índices de área foliar menores a los obtenidos en esta investigación, aún cuando el cultivo se manejó bajo condiciones óptimas, ellos citan modelo es una herramienta útil para diferenciar las condiciones de suelo y clima de la región de estudio.

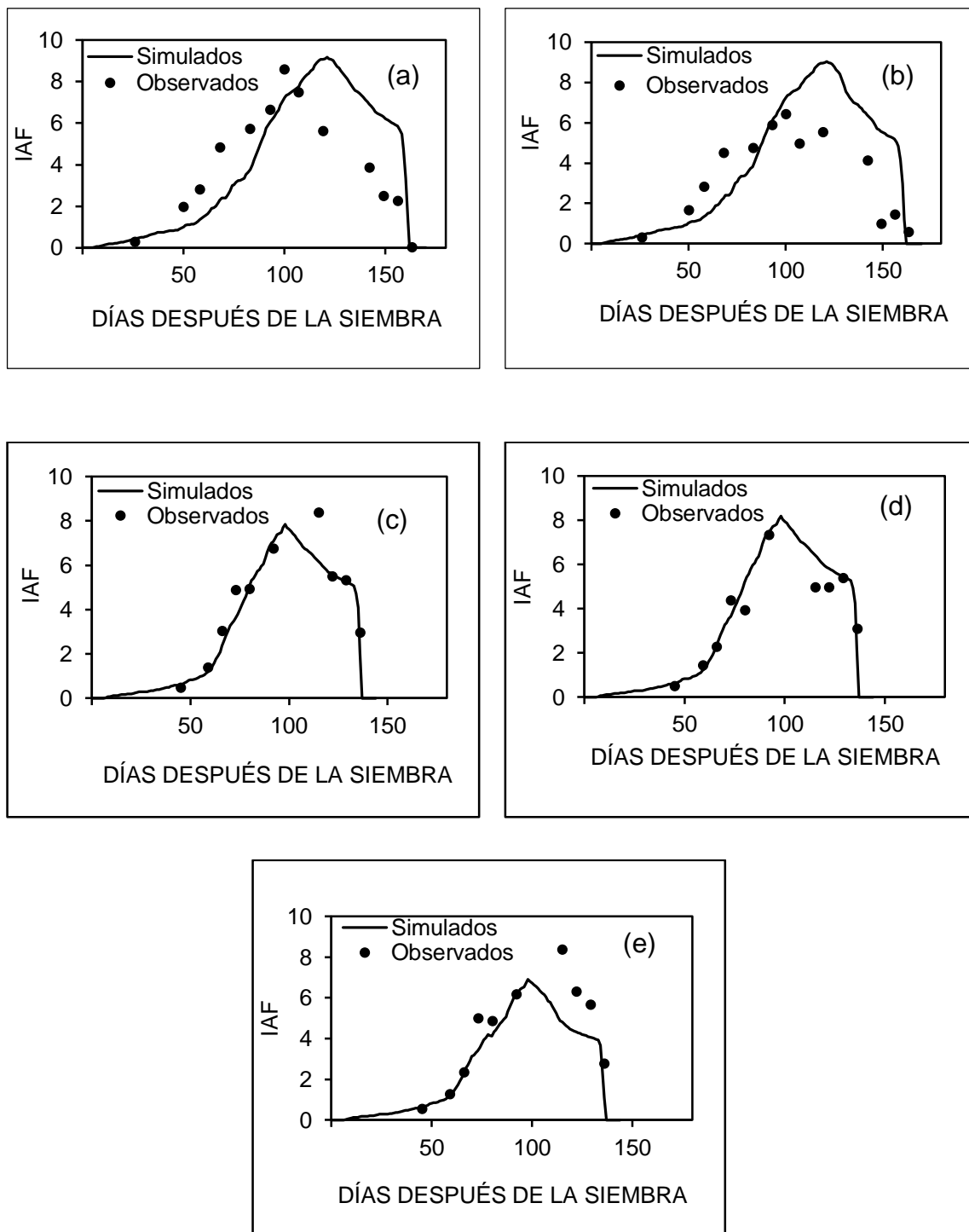


Figura 6. Índice de área foliar observado y simulado, calibrados en el modelo CERES-Wheat para el cultivar Júpere C2001. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).

Cuadro 13. Comparación de valores promedio observados y simulados de índice de área foliar durante el ciclo del cultivo, coeficiente de determinación (R^2), cuadrado medio del error (RMSE) e índice de concordancia (d).

Índice de área foliar					
Tratamientos	Media	Media	R^2	d	RMSE
	observada	simulada			
T1	4.07	4.47	0.49	0.83	2.22
T2	3.41	4.32	0.47	0.79	2.29
T3	4.36	3.90	0.89	0.95	0.88
T4	3.82	4.03	0.90	0.96	0.76
T5	4.36	3.21	0.81	0.85	1.59

Cuadro 14. Valores del máximo índice de área foliar observado y simulado para cada tratamiento del cultivo de trigo variedad Júpare C2001.

Máximo índice de área foliar			
Tratamientos			Diferencia (%)
	Simulados	Observados	
T1 (a)	9.2	8.6	+6.98
T2 (b)	9.0	6.5	+38.46
T3 (c)	7.8	8.4	-7.14
T4 (d)	8.2	8.4	+2.38
T5 (e)	6.9	7.3	-5.48

Simulación de materia seca en hojas

En la simulación de peso seco de hojas durante el ciclo del cultivo, los tratamientos T3 y T4 mostraron un buen ajuste de los datos simulados con los observados (Figura 7), con valores de $R^2 = 0.85$ y 0.89 , valores de $d = 0.90$ y 0.93 y los valores de RMSE de 718 y 615 kg ha^{-1} (Cuadro 15). En T5 el ajuste fue menor con valores de $R^2 = 0.72$, valores de $d = 0.78$ y el valor de $\text{RMSE} = 1020 \text{ kg ha}^{-1}$ (Cuadro 15). Los tratamientos T1 y T2 tuvieron un bajo ajuste, en la mayor parte del ciclo el modelo subestimó el peso seco de hoja, los valores de los indicadores fueron $R^2 = 0.74$ y 0.57 , valores de $d = 0.78$ y 0.72 y los valores de RMSE de 1393 y 1499 kg ha^{-1} (Cuadro 15).

Singh *et al.* (2008), reportaron que el modelo subestimó en todos los tratamientos la acumulación de materia seca y explicaron como posible causa un error en la partición de la biomasa.

Bannayan *et al.*, (2003), encontraron una tendencia del modelo a subestimar la producción de biomasa en casi todos sus tratamientos y lo atribuyen a un desajuste en los parámetros de producción del dosel como lo es el área específica (área peso^{-1}), a los coeficientes de partición de biomasa, a la tasa de senescencia o a la absorción de la radiación solar para la producción de biomasa. Langensiepen *et al.* (2008) encontraron errores en la predicción del rendimiento y la acumulación de materia seca (biomasa), le atribuyeron esto a las diferencias de tiempo (clima) y la combinación de coeficientes genéticos utilizados en la calibración.

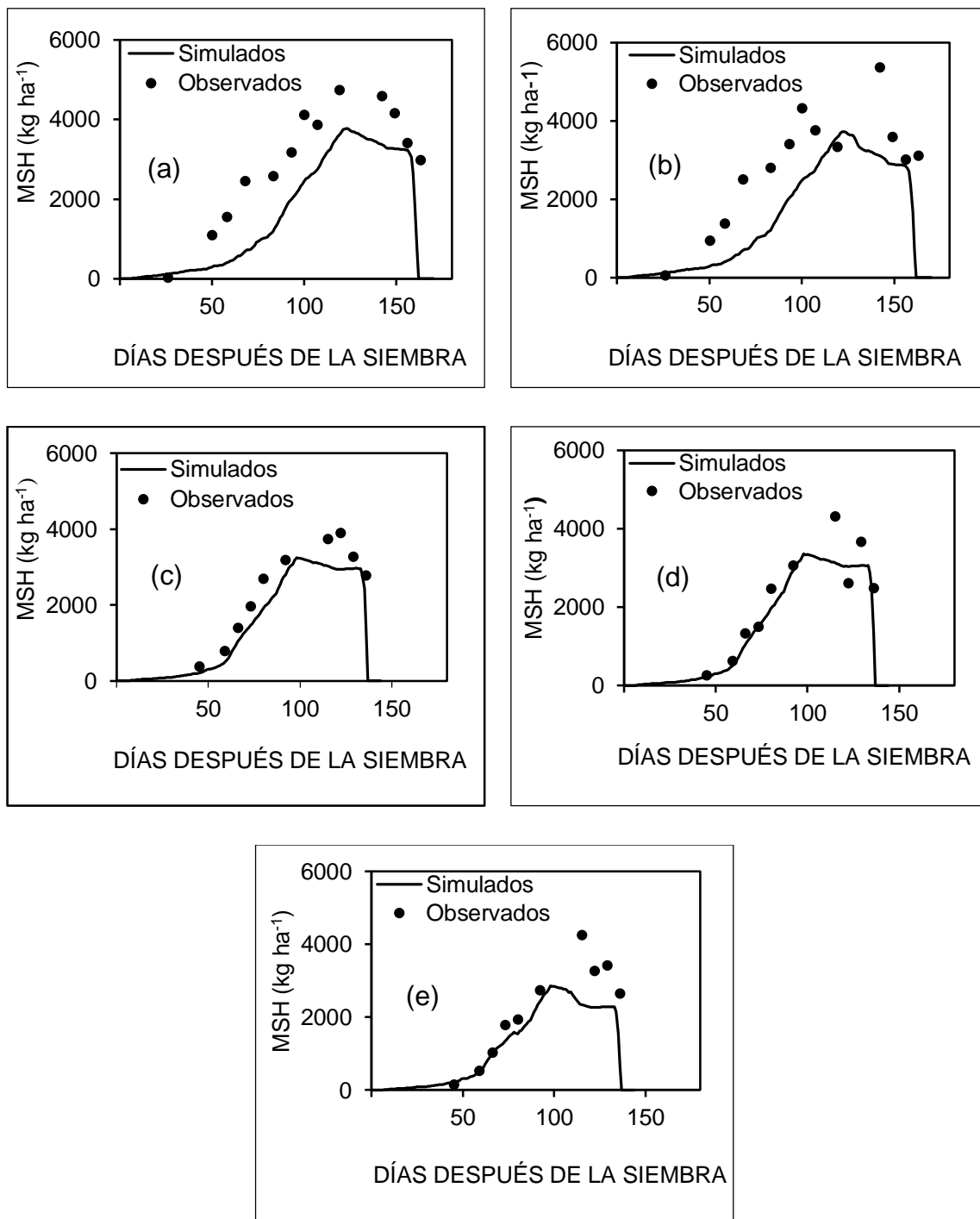


Figura 7. Materia seca parcial en hojas (MSH, kg ha⁻¹) observado y simulado, calibrados en el modelo CERES-Wheat para el cultivar Júpate C2001. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).

Cuadro 15. Comparación de valores promedio observados y simulados de materia seca parcial en hojas durante el ciclo del cultivo, coeficiente de determinación (R^2), cuadrado medio del error (RMSE) e índice de concordancia (d).

Materia seca parcial en hojas					
Tratamientos	Media	Media	R^2	d	RMSE
	observada	simulada			
T1	2993	1798	0.74	0.78	1393
T2	2901	1719	0.57	0.72	1499
T3	2420	1814	0.89	0.90	718
T4	2241	1863	0.85	0.93	615
T5	2183	1455	0.72	0.78	1020

Simulación del balance de agua en el suelo

En la simulación del contenido de humedad de los tratamientos durante el ciclo del cultivo los T3, T4 y T5 mostraron mejor ajuste (Cuadro 16) ($R^2 > 0.56$, $d > 0.69$ y el RMSE entre 13.72 y 24.30 mm), la simulación del comportamiento en los tres tratamientos presenta una tendencia similar a los valores observados (Figura 8), el menor ajuste se presenta en T1 y T2 al final del ciclo donde el modelo sobrestimo el contenido de agua en el suelo (Figura 8) con R^2 de 0.31 y 0.28, d de 0.61 y 0.73, RMSE de 28.47 y 27.84 mm respectivamente (Cuadro 16). Esta sobrestimación puede deberse a que la evapotranspiración calculada por el modelo fue menor que la obtenida por el cultivo.

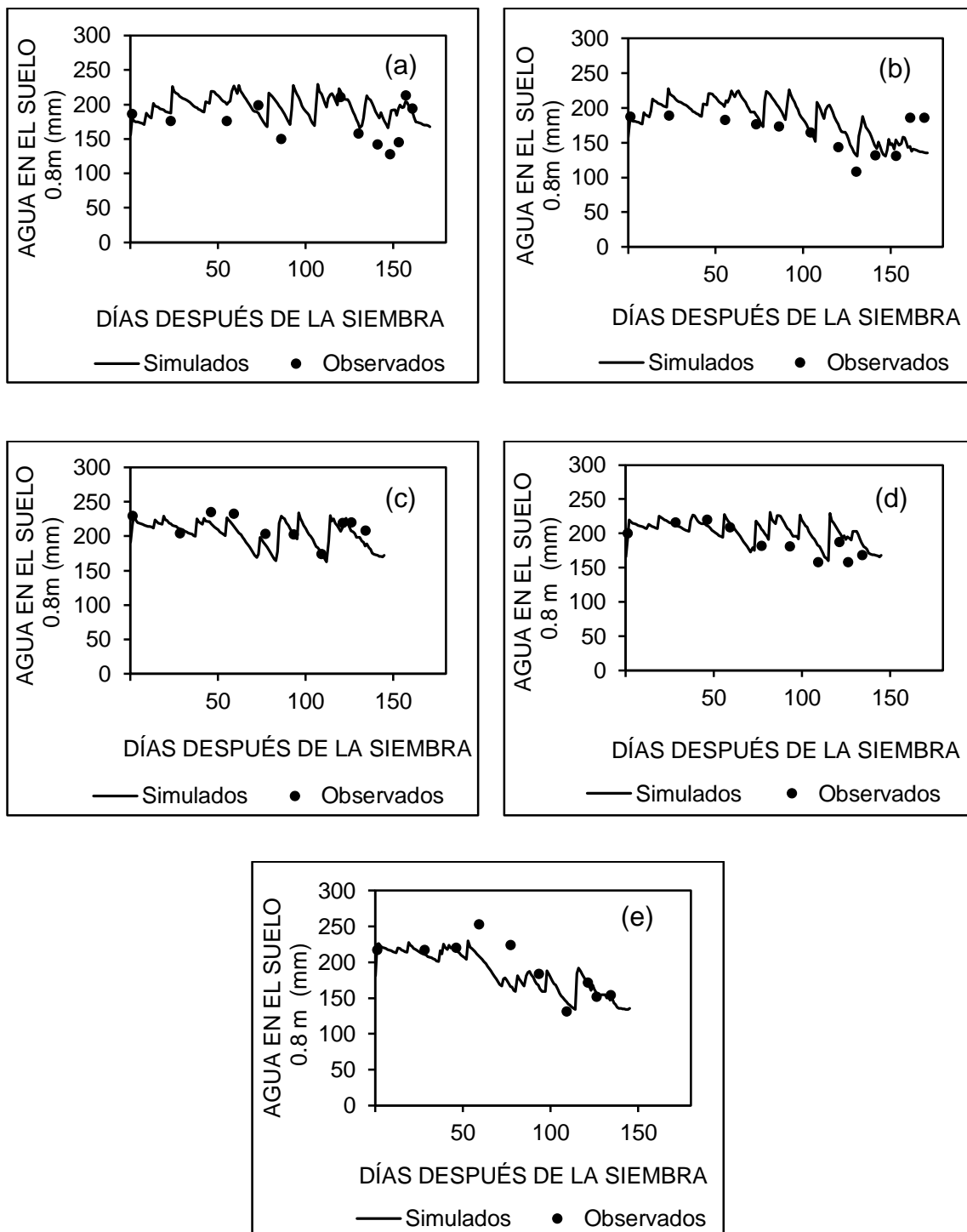


Figura 8. Contenido de agua en el suelo observado y simulado durante el ciclo del cultivo (mm), calibrados en el modelo CERES-Wheat para el cultivar Júpare C2001. T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d); T5 (e).

Cuadro 16. Valores promedios observados y simulados del contenido de agua en el suelo durante el ciclo del cultivo (mm) coeficiente de determinación (R^2), cuadrado medio del error (RMSE) e índice de concordancia (d).

Balance de agua en el suelo					
Tratamientos	Media observada	Media simulada	R^2	d	RMSE
T1	174	191	0.31	0.61	28.47
T2	164	172	0.28	0.73	27.84
T3	213	203	0.70	0.82	13.72
T4	188	201	0.56	0.69	20.00
T5	193	182	0.66	0.86	24.36

CONCLUSIONES

Se obtuvieron los coeficientes genéticos para la variedad de trigo Jupare C2001 con el tratamiento en condición de manejo óptima en la segunda fecha de siembra. En los tratamientos de la segunda fecha de siembra el modelo simuló con buen ajuste, etapas de desarrollo del cultivo, así como el rendimiento de grano, materia seca total, índice de área foliar, materia seca en hojas y contenido de agua en el suelo, no así en los tratamientos de la primera siembra, donde el modelo tuvo una baja predicción en la simulación de rendimiento de grano, materia seca total, índice de área foliar y materia seca en hojas, lo cual mostraría que los coeficientes genéticos obtenidos para una fecha de siembra, no son adecuados para efectuar la simulación aceptable en la otra fecha de siembra o ambiente, lo cual podría limitar su uso como herramienta de predicción bajo otras condiciones ambientales.

REFERENCIAS

- Amor, V. M. I., Droogers, P., Makin, I.W., Das, G.A. 2001. Crop Growth and Soil Water balance modeling to explore water management options. IWMI Working Paper 22- International Water Management Institute. Colombo, Sri, Lanka, 26 pp. ISBN: 9290904585
- Andarzian, B., Hoogenboom, G., Bannayan, M., Shirali, M., Andarzian, B. 2015. Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-Wheat model. *J. Saudi Soc. For Agric. Sci.* 14, 189-199.
- Arnold, J.G., Neitsch, S.L., Williams, J.R. 1991. Soil and Water Assessment Tool User's Manual (Version 99.2) Blackland Research Center, Texas Agricultural Experimental Station. Temple, TX.
- Arora, V.K., Singh, H., Singh, B. 2007. Analyzing wheat productivity responses to climatic, irrigation and fertilizer-nitrogen regimes in a semi-arid subtropical environment using the CERES-Wheat model. *Agr Water Manage.* 94, 22-30.
- Bannayan, M., Crout, N.M.J., Hoogenboom, G. 2003. Application of the CERES-wheat model for within-season prediction of winter wheat yield in the United Kingdom. *Agron. J.* 95, 114-125.
- Barbieri, P.A., Rozas, H.S., Echeverría, H.E. 2008. Time of nitrogen application affects nitrogen use efficiency of wheat in the humid pampas of Argentina. *Can. J. Plant Sci.* 88: 849-857.
- Boote, K. J., Jones, J. W., Hoogenboom, G., White, J.W. 2010. The role of crop systems simulation in agriculture and environment. *Int. J. Agr. Environ. Inform. Syst.* 1, 41-54.
- Boote, K. J., Jones, J. W., White, J. W. Asseng, S., Lisazo, J.I. 2013. Putting mechanisms into crop production models. *Plant Cell Environ.* 36, 1658–1672.
- Bouman, B. A. M., Van Keulen, H., Van Laarh, H. H., Rabbingeh, R. 1996. The 'School of de Wit' Crop Growth Simulation Models: A Pedigree and Historical Overview. *Agric. Sys.* 52, 171-198.
- DeJonge, K.C., Kaleita, A. L.,Thorp, Kelly, R. 2007. Simulating the effects of spatially variable irrigation on corn yields, costs, and revenue in Iowa. *Agr Water Manage.* 92, 99-109.

- De San Celedonio, R. P., Micheloud, J. R., Abeledo, L. G., Miralles, D. J., Slafer, G. A. 2014. Riesgo de anegamiento en trigo (*Triticum aestivum* L) para distintas localidades de la region triguera Argentina. Ciencia del Suelo. 32, 233-246.
- Dettori, M., Cesaraccio, C., Motroni, A., Spano, D., Duce, P. 2011. Using CERES-wheat to simulate durum wheat production and phenology in southern Sardinia, Italy. Field Crop Res. 120, 179-188.
- Dhungana, P., Eskridge, K.M. Weiss, A. Baenziger, P.S. 2006. Designing crop technology for a future climate: An example using response surface methodology and the CERES-Wheat model. Agr Syst. 87, 63-79.
- Fageria, N. K., Santos, A. B. 2008. Yield physiology of dry bean. J. Plant Nutr. 31, 983-1004.
- Fernández, P. M. E. 2013. Diagnóstico de modelos agroclimáticos: Evaluación del riesgo agroclimático por sectores. Abril. Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo (FONADE)-Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (Segundo informe), Colombia, 49 pp. De:
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Uso+de+Modelos+agroclim%C3%A1ticos.pdf/9f53a23d-9afa-4fda-aad3-5fe407c6cfea> Consultado en Agosto 2015.
- Financiera Rural. 2014. Panorama del trigo. Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario Rural Forestal y Pesquero Panorama del trigo. Mayo. En: [http://www.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Panoramas/Panorama%20Trigo%20\(may%202014\).pdf](http://www.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Panoramas/Panorama%20Trigo%20(may%202014).pdf) Consultado en Septiembre 2015.
- Glotter, M., Elliott, J., McInerney, D., Best, N., Foster, I., Moyer, E. J. 2014. Evaluating the utility of dynamical downscaling in agricultural impacts projections. Proc Natl Acad Sci. 111, 8776-8781.
- Godwin, D., Ritchie, J., Singh, U., Hunt, L. 1989. A user's guide to CERES-Wheat V2.10. International Fertilizer Development Center (IFDC)-International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT)- Michigan State University . Muscle, Shoalds, AL, EUA. 94 pp. En: http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABU270.pdf Consultado en Septiembre 2015.
- Grant, W.E., Swannack, T.M. 2008. Ecological Modeling a Common Sense Approach to Theory and Practice. Blackwell Publishing. Singapore, Hong Kong, 155 pp. ISBN: 9781405161688

- 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. En: <http://www.fertilizando.com/articulos/SimulacionDesarrolloCrecimientoYRendimientoEnMaiz.pdf>
- Haefner, J. W. 2005. Modeling Biological System: principles and applications. (Segunda edición) Springer. New York, USA, 475 pp. ISBN: 9780387250113
- Hernández, N., Soto, F., Caballero, A. 2009. Modelos de simulación de cultivos, características y usos. Cultivos Tropicales. 30, 73-82.
- Hodges, T., Ritchie, J.T. 1991. The CERES-Wheat phenology model. In: Hodges, T. (Ed.), Predicting Crop Phenology. Pág. 133–143. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 248 pp. ISBN: 084936745X
- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, R.W., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Boot, K.J., Singh, U., Uryasev, O., Bowen, W.T., Gijsman, A.J., du Toit, A., White, J.W., Tsuji, G.Y., 2010. Decision support system for Agro-technology Transfer Version 4.5 [CD- ROM]. University of Hawaii, Honolulu, HI, USA.
- Hunt, L. A., Pararajasingham, S., Jones, J.W., Hoogenboom, G., Imamura, D. T., Ogoshi, R. M. 1993. GENCALC: Software to facilitate the use of crop models for analyzing field experiments. J. Agron. 85, 1090-1094.
- Hunt, T. 2006. Genotype Coefficients CROPSIM-CERES Wheat-Barley Module. University of Guelph. Training Workshop. 15 pp
- Johnson, I. R. 2016. DairyMod and the SGS Pasture Model: A mathematical description of the biophysical model structure. IMJ Consultants, Dorrigo, NSW, Australia., 130 pp. En: http://imj.com.au/wp-content/uploads/2016/05/DM_SGS_documentation.pdf
- 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. Agron. 18, 235-265.
- Lal, M., Singh, K.K., Rathore, L.S., Srinivasan, G., Saseendran, S.A. 1998. Vulnerability of Rice and Wheat yields in NW India to future changes in climate. Agr Forest Meteorol. 89, 101-114.
- Langensiepen, M., Hanus, H., Schoop, P., Grasle, W. 2008. Validating CERES – Wheat under North - German environmental conditions. Agri. Syst. 97, 34–47.

- LeBlanc, D. 2004. Statistics, concepts and applications for science. Jones and Bartlett Publishers. Sudbury, Massachussets. 383 p.
- Lizaso, J.I., Boote, K.J., Jones, J.W., Porter, C.H., Echarte, L., Westgate, M.E., Sonohat, G. 2011. CSM-IXIM: A new maize simulation model for DSSAT version 4.5. *Agron. J.* 103, 766-779.
- Mavromatis, T. 2014. Pre-season prediction of regional rainfed wheat yield in northern Greece with CERES-wheat. *Theor Appl Climatol.* 117: 653-665.
- McMaster, G., White, J. W., Hunt, L. A., Jamieson, P. D., Dhillon, S. S., Ortiz-Monasterio, J. I. 2008. Simulating the Influence of Vernalization, Photoperiod and Optimum Temperature on Wheat Developmental Rates. *Ann. Bot.* 102, 561-569.
- McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D.P., Freebairn, D.M. 1996. APSIM: a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural systems research. *Agric. Syst.* 50, 255-271.
- Moreno, R.O.H., Rodríguez, C.J., Canseco, V. E.P., Martín, E. C., Herrera, A. H., Turrent, F. A. 2010. Época de aplicación del primer riego y densidad de plantas en el cultivo de trigo. *BIOTecnia.* 12, 32-41.
- Moreno, S., and Weiss, A. 2004. Improvements in the simulation of kernel number and grain yield in CERES-Wheat. *Field Crop Res.* 88, 157–169.
- Ottman, M. J. 2008. Predicting wheat growth using the CSM-Cropsim-CERES-wheat crop model. *Forage and Grain Report.* October 2008. 156: 12-20.
- Palosuo, T. A., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Hlavinka, P., Torinese M. M., Olesen, J. E., Patil, R. H., Ruget, F. O., Rumbaur, C., Takac, J., Trnka M., Bindi, M., Aldag, B., Ewert, F., Ferrise, R., Mirschel W., Saylan L., Siska B., Rotter R. 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *Eur J Agron.* 35, 103-114.
- Peña, R. F. M. 2011. Predicción del crecimiento, desarrollo y producción de cultivos forrajeros con un modelo biofísico de simulación y el programa DSSAT, en el sur de Nuevo León, México. UAAAN (tesis de posgrado). Saltillo, Coahuila, México, 107 pp. En: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/4005>
[Consultado en Enero 2015.](http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/4005)

- Prabhakar, B. N., Halepyati, A. S., Desai, B. K., Pujari, B. T. 2007. Growing Degree Days and Photo Thermal Units Accumulation of Wheat (*Triticum aestivum* L. and *T. durum* Desf.) Genotypes as Influenced by Dates of Sowing. *Karnataka J. Agric. Sci.* 20, 594-595.
- Porter, J.R., Jamieson, P. D., Wilson, D. R. 1993. Comparison of the wheat simulation models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat and SWHEAT for non-limiting conditions of crop growth. *Field Crop Res.* 33, 131-157.
- Radulovich, R. 2009. Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo. *Agron Costarric.* 33, 121-124.
- Ramawat, N., Sharma, H. L., Kumar, R. 2012. Simulation, validation and application of CERES – Maize model for yield maximization of maize in North Western Himalayas. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 10, 303-318.
- Rezzoug, W., Gabrielle, B., Suleiman, A., Benabdeli, K. 2008. Application and evaluation of the DSSAT wheat in the Tiaret region of Algeria. *Afr J Agric Res.* 3, 284-296.
- Ritchie, J.T., Godwin, D. 1991. CERES Wheat 2.0. En: http://nowlin.css.msu.edu/wheat_book/ Consultado en Julio 2015.
- Rodríguez, A.M., Díaz, S.H., Aizpuru, G.E., López, T.R. Zamora, V.V.M. 2010. Modelos de simulación para cereales forrajeros en el sur de Nuevo León, México. *Agraria.* 7, 6-16.
- 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. *Sociedad Española para el Estudio de los Pastos.* 40, 117-138.
- Sánchez, S. N. 2008. Simulación y predicción de escenarios en sistemas ecológicos de impacto ambiental y clima. *Departamento del hombre y su ambiente (ContactoS).* 67, 5-9.
- Semenov, M.A., Stratonovitch, P., Alghabari, F., Gooding, M.J. 2014. Adapting wheat in Europe for climate change. *J Cereal Sci.* 59, 245-256.
- SIAP.2015. Cierre de producción agrícola por estado. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. En: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/> Consultado en Julio 2015.
- Singh, A. K., Tripathy, R., Chopra, U. K. 2008. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water–nitrogen interactions in wheat crop. *Agr Water Manage.* 95, 776-786.

- Soddu, A., Deidda, R., Marrocu, M., Meloni, R., Paniconi, C., Ludwig, R., Sodde, M., Mascaro, G., Perra, E. 2013. Climate variability and durum wheat adaptation using the AquaCrop model in southern Sardinia. *Procedia Environ Sci.* 19, 830-835.
- Stickler, F.C., Wearden, S. Pauli, A. W. 1961. Leaf area determination in grain sorghum. *Agr. Jour.* 53, 187-188.
- Stockle, C.O., Nelson, R., 1994. *Cropsyst User's manual (Version 1.0)*. Biological Systems Engineering Dept., Washington State University, Pullman, WA, USA.
- Teh, C. 2006. *Introduction to Mathematical Modeling of Crop Growth: How the equations are derived and assembled into a computer model*. Brown Walker Press. Boca Ratón, FL, USA, 178 pp. ISBN: 1581129998
- Thorp, K. R., DeJonge, K. C., Kaleita, A. L., Batchelor, W. D., Paz J.O. 2008. Methodology for the use of DSSAT models for precision agricultura decision support. *Computers and Electronics in Agriculture.* 64, 276-285.
- Uehara, G., Tsuji, G. Y. 1998. Overview of IBSNAT. In: Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G., Tornton, P. K. (Eds.). *Understanding option for agricultural production: Systems approaches for sustainable Agricultural Development*. Pág.1-7 pp. Springer Science, business media B. V. Gainesville, FL, USA, 403 pp.
- Valizadeh, J., Ziaei, S. M., Mazlounzadeh, S. M. 2014. Assessing climate change impacts on wheat production. *J Saudi Soc Agr Sci.* 13, 107-115.
- Vandendriessche, H.J., Van, I.M.K. 1995. Crop Models and Decision Support Systems for Yield Forecasting and Management of the Sugar Beet Crop. *Eur. J. Agron.* 4 (3), 269-279.
- Villalobos, F. J., Mateos, L., Orgaz, F., Fereres, E. 2009. *Fitotecnia bases y tecnologías de la producción agrícola. (Segunda Edición)* Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España, 493 pp. ISBN: 9788484763826
- Villanueva, C.A. 2009. Modelo simple de simulación de un rebaño caprino (MSSRC) en pastoreo en diferentes escenarios ambientales en la región semiárida del noreste de Tamaulipas. UAT (Tesis doctorado). Cd. Victoria, Tamaulipas, México, 99 pp. En: [https://www.google.com.mx/?gfe_rd=cr&ei=TuxyV4bfFNjAqAW-hYHoBQ&gws_rd=ssl#q=Modelo+simple+de+simulaci%C3%B3n+de+un+reba%C3%B1o+caprino+\(MSSRC\)+en+pastoreo+en+diferentes+escenarios++ambientales+en+la+regi%C3%B3n+semi%C3%A1rida+del+noreste+de+Tamaulipas](https://www.google.com.mx/?gfe_rd=cr&ei=TuxyV4bfFNjAqAW-hYHoBQ&gws_rd=ssl#q=Modelo+simple+de+simulaci%C3%B3n+de+un+reba%C3%B1o+caprino+(MSSRC)+en+pastoreo+en+diferentes+escenarios++ambientales+en+la+regi%C3%B3n+semi%C3%A1rida+del+noreste+de+Tamaulipas) Consultado en Agosto 2015.

- Villaseñor, M.H.E., Limón, O. A., Rodríguez, G.M.F., Martínez, C.E., Hortelano, S.R.R., Mariscal, A.L.A. 2011. Evaluación bajo condiciones de temporal de variedades de trigo macarronero generadas para riego. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*.2,759-764.
- Wallach, D. 2006. The two forms of crop models. In: Wallach, D., Makowski, D., Jones, J.W. (Eds.). *Working with Dynamic Crop Models Evaluation, Análisis, Parameterización and Applications*. Elsevier. Amsterdam, Reino Unido, 447 pp.
- Wang, E. and Engel, T. 1998. Simulation of Phenological Development of Wheat Crops. *Agric. Syst.*58, 1-24.
- Wang, S., Li, H., Yang, Y., Wang, H., Yang, Y., Jia, Y. 2012. Using DSSAT Model to asses spring wheat and maize water use in the arid oasis of Northwest China. *J. Food Agric. Environ.* 10: 911-918.
- Wikarmpapraharn, C. y Kositsakulchai, E. 2010. Evaluation of ORYZA2000 and CERES-Rice Models under Potential Growth Condition in the Central Plain of Thailand. *Thai. J. Agric. Sci.* 43, 17-29.
- Williams, J. R., Dyke, P. T., Fuchs, W. W., Benson, V. W., Rice, O. W., Taylor, E. D. 1990. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator: 2. User manual. Sharpley, A. N., Williams, J. R. (Eds.). USDA Tech. Bull. 1768, 127 pp.
- Willmott, C. J., Akleson, G.S., Davis, R.E., Fedema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., Odonnel, J. Rowe, C.M. 1985. Statistic for the evaluation and comparison of models. *J. Geophys. Res.* 90: 8995-9005.
- Wu, CH., Anlauf, R., Ma, Y. 2013. Application of the DSSAT Model to Simulate Wheat Growth in Eastern China. *J. Agric. Sci.* 5, 198-208.