

**VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE CRECIMIENTO
NICOLET B3 PARA EL CULTIVO DE LECHUGA (*Lactuca sativa*
L.) BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO**

ANTONIO JUÁREZ MALDONADO

TESIS

Presentada como requisito parcial para
Obtener el Grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN HORTICULTURA**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”
PROGRAMA DE GRADUADOS**

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México
Octubre de 2010

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIRECCIÓN DE POSTGRADO

**VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE CRECIMIENTO
NICOLET B3 PARA EL CULTIVO DE LECHUGA (*Lactuca sativa*
L.) BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO**

TESIS
POR
ANTONIO JUÁREZ MALDONADO

Elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y
aprobada como requisito parcial, para optar al grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN HORTICULTURA**

COMITÉ PARTICULAR

Asesor Principal _____
Dr. Karim de Alba Romenus

Asesor _____
Dr. Adalberto Benavides Mendoza

Asesor _____
Dr. Valentín Robledo Torres

Asesor _____
Dr. Marco Iván Ramírez Sosa Morán

Dr. Jerónimo Landeros Flores
Director de Postgrado

Buenvista, Saltillo, Coahuila. Octubre de 2010

DEDICATORIA

A mi esposa Adry, por todo su amor y apoyo incondicional, por estar conmigo en cada paso en la vida, por todo.

A mis padres, que con sus acciones me han enseñado el camino correcto.

A mis abuelos que son muy especiales para mí.

A mi hermano Rigoberto que ha sido un ejemplo a seguir.

A mis hermanas Maribel y Yadi por todo su apoyo y cariño.

A mis amigos Jairo y Octavio por todo lo que hemos pasado.

Al Dr. Julio Lozano Gutiérrez que me ha dado todo su apoyo y su confianza.

A todos los que me han apoyado y que han servido de ejemplo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico para realizar mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Al programa de la Maestría en Ciencias en Horticultura.

Al Dr. Karim de Alba Romenus por brindarme todo su apoyo, asesoría y tiempo para el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Valentín Robledo Torres por su apoyo y asesoría.

Al Dr. Adalberto Benavides Mendoza por su apoyo y asesoría.

Al Dr. Marco Iván Ramírez Sosa Morán por su asesoría.

A la Dra. América Morales Díaz por sus valiosas observaciones.

Al Dr. Mario Vázquez Badillo por su apoyo y orientación.

Al Dr. Homero Ramírez Rodríguez por su apoyo.

A todos los profesores del programa de la Maestría en Ciencias en Horticultura.

A todos los compañeros y trabajadores que colaboraron para el desarrollo de este trabajo.

COMPENDIO

VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE CRECIMIENTO NICOLET B3 PARA EL CULTIVO DE LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO

POR
ANTONIO JUÁREZ MALDONADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN HORTICULTURA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO

Buenavista, Saltillo, Coahuila. Octubre de 2010

Dr. Karim de Alba Romenus. – Asesor –

Palabras clave: *Lactuca sativa* L., modelo matemático, NICOLET B3, simulación, validación.

El desarrollo de este trabajo se originó a partir del interés en el modelaje y simulación de hortalizas bajo condiciones de invernadero por ser una línea de investigación relativamente reciente en nuestro país, por lo que es de gran importancia el desarrollo de investigaciones sobre este tema ya que pueden ser de gran utilidad en el desarrollo y producción de hortalizas, ayudando en áreas como la optimización, planeación de cultivos, control de condiciones climáticas dentro del invernadero, selección de fechas de siembra y cosecha, planeación en la nutrición del cultivo, etc.

Se decidió trabajar con el cultivo de lechuga por ser un cultivo relativamente fácil de modelar y trabajar, además de que como es un área de investigación totalmente nueva en la universidad, específicamente en la Maestría en Ciencias en Horticultura, se seleccionó para la investigación el modelo matemático de crecimiento NICOLET B3 el cual se ha trabajado ampliamente en Europa por lo que es de importancia conocer sus habilidades en nuestro país. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue validar el modelo NICOLET B3 de crecimiento para el cultivo de lechuga bajo condiciones de invernadero en la región sureste de Coahuila, México.

Para el desarrollo del experimento se utilizó semilla de lechuga (*Lactuca sativa* L.) var. "Great lakes" y se desarrolló el cultivo bajo condiciones de invernadero. A lo largo del cultivo se tomaron datos climáticos dentro del invernadero (CO₂, temperatura y PAR) que fueron usados como entradas para el modelo, así mismo se tomaron muestras de cinco plantas seleccionadas completamente al azar dos veces por semana y se registraron la hora y fecha de muestreo y peso fresco, el peso seco se obtuvo después de secar las muestras por 48 horas a una temperatura de 80°C, estos datos fueron usados para comparar con las salidas del modelo y posteriormente su validación.

La programación y simulación realizadas del modelo se trabajaron en la herramienta Simulink de MATLAB R2009a, en el que se utilizaron bloques para la programación de las ecuaciones, también, se utilizó un algoritmo de integración ode45. Para obtener la validación del modelo se utilizó el coeficiente de correlación ajustado R², y el manejo de los datos se trabajó en Microsoft Excel 2010 (beta).

ABSTRACT

VALIDATION OF GROWTH MATHEMATICAL MODEL NICOLET B3 FOR LETTUCE CROP (*Lactuca sativa* L.) UNDER GREENHOUSE CONDITIONS

**BY
ANTONIO JUÁREZ MALDONADO**

**MASTER OF SCIECES
IN HORTICULTURE
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

Buenavista, Saltillo, Coahuila. October 2010

PhD. Karim de Alba Romenus. – Chairman –

Key words: *Lactuca sativa* L., mathematical model, NICOLET B3, simulation, validation.

The development of the present work was originated by the interest in modeling and simulation of crop growth under greenhouse conditions and for being a relatively new research area in our country. That is why the research development about this topic is of great importance due to the fact that it is of great usefulness in horticulture production, helping in areas as culture planning and optimization, climatic conditions control in green houses, crop and seedling date selection, nutrition planning, etc.

Lettuce crop was selected mainly because it is a relatively simple culture for working and modeling, besides the fact that it is a totally new research area

in this university, specifically in the Master in Science in Horticulture Program. The NICOLET B3 model was selected for this research because it has been widely used in Europe so that it is important to know its potential in our country. Therefore, the objective of the present work was to validate NICOLET B3 model for lettuce growth under greenhouse conditions in the southeast region of Coahuila State, Mexico.

In order to develop the experiment, “Great Lakes” variety lettuce seed (*Lactuca sativa* L.) was used and it was developed under greenhouse conditions. All through the culture process several climatic data were taken inside the green house: CO₂, temperature and PAR. Those data were used as input to the model. In the same way 5 samples of randomly selected plants were taken twice a week where sampling dates and hours were registered. Fresh matter was measured and dry matter weight was taken registered after drying the samples for 48 hours at a temperature of 80°C. Those data were used to compare the model output and validate the model.

The model programming and simulation were carried out using the MATLAB R2009a Simulink tool, where blocks were used for equation representation and ode45 integration algorithm was used. In order to validate the model the adjusted correlation coefficient R^2 was used and data was analyzed using the Microsoft Excel 2010 (beta).

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVO GENERAL.....	4
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
III. HIPÓTESIS.....	5
IV. REVISION DE LITERATURA.....	6
4.1 Modelos matemáticos.....	6
4.2 Modelos matemáticos en la horticultura.....	8
4.3 Modelos sobre tomate.....	10
4.4 Modelos sobre pimiento.....	12
4.5 Modelos sobre pepino.....	13
4.6 Modelos sobre lechuga.....	15
4.6.1 NICOLET.....	16
4.7 Otros modelos.....	17
4.8 Análisis de sensibilidad de modelos.....	19
4.9 Calibración y validación de modelos.....	19
V. MATERIALES Y METODOS.....	21
5.1 Descripción del modelo.....	21
5.2 Desarrollo experimental del cultivo de lechuga.....	27
5.3 Variables de entrada usadas en la simulación.....	28

5.4 Programación y simulación.....	29
5.5 Salidas del modelo.....	29
5.6 Calibración del modelo.....	30
5.7 Validación del modelo.....	31
VI. RESULTADOS.....	32
6.1 Calibración del modelo.....	32
6.2 Curva de crecimiento de lechuga.....	33
6.3 Validación del modelo.....	34
VII. DISCUSIÓN.....	36
VIII. CONCLUSIONES.....	38
IX. LITERATURA CITADA.....	39
X. ANEXO.....	48
Artículo.....	49

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Tabla I. Valores de los parámetros utilizados durante la simulación del modelo NICOLET B3 y su significado.....	30
Tabla II. Ajuste de parámetros.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1. Curva de crecimiento del cultivo de lechuga (Peso fresco Kg m ⁻²).....	33
Fig. 2. Curva de crecimiento del cultivo de lechuga (Peso seco Kg m ⁻²).....	33
Fig. 3. Correlación entre datos reales del crecimiento de lechuga (Materia fresca Kg m ⁻²) y los simulados por el modelo.....	34
Fig. 4. Correlación entre datos reales del crecimiento de lechuga (Materia seca Kg m ⁻²) y los simulados por el modelo.....	35
Fig. 5. Comparación de datos de materia fresca. Real vs Simulado.....	35
Fig. 6. Comparación de datos de materia seca. Real vs Simulado.....	36

I. INTRODUCCIÓN

Los rápidos cambios alrededor de la agricultura tales como la globalización del mercado, cambios en el ambiente, etc., obligan a un constante desarrollo de nuevas vías de producción de modo que garanticen la sustentabilidad de la agricultura (Bergez *et al.*, 2007).

Una técnica moderna de la agricultura es la producción de cultivos en invernaderos. Esta nos da una ventaja sobre la producción a cielo abierto porque establece una barrera entre el ambiente externo y el cultivo, creando un microclima que permite protegerlo de condiciones adversas (viento, granizo, plagas, etc.) y controlar factores como la temperatura y radiación. En México, el uso de invernaderos para la producción de hortalizas ha aumentado rápidamente en los últimos años. El éxito en estos agronegocios se ha dado por el incremento en la eficiencia de producción, mayor calidad y alta productividad (Castañeda-Miranda *et al.*, 2007), por lo tanto, en el campo de la horticultura, es necesario mejorar en estos ámbitos, para lo cual se necesita controlar y optimizar las variables ambientales (López-Cruz *et al.*, 2004).

Hoy en día, la ciencia es inconcebible sin el desarrollo de modelos matemáticos que nos permitan incrementar el conocimiento sobre un sistema. La investigación agrícola, y en especial la horticultura, no son la excepción (López-Cruz, 2003). La aplicación de la modelación de cultivos en el campo de la agricultura data de la década de 1970 y a partir de entonces se han venido

desarrollando modelos (Cheeroo-Nayamuth, 1999). La utilización de estos modelos matemáticos permite probar hipótesis científicas, además son una herramienta que permite mejorar el conocimiento actual sobre un sistema; por esto, la agronomía y en particular la horticultura, necesita de estos modelos de cultivos para muchas aplicaciones, como la predicción del rendimiento y manejo del cultivo, entre otras (López-Cruz, 2003).

Así mismo, los modelos matemáticos son herramientas poderosas para poner a prueba las hipótesis, sintetizar los conocimientos, describir y comprender los sistemas complejos y para comparar los diferentes escenarios. Estos modelos se pueden utilizar en la toma de decisiones como sistemas de apoyo, en el control climático del invernadero y en la predicción y planificación de la producción (Marcelis *et al.*, 2006).

Los modelos de cultivos ofrecen un marco conceptual para la organización de la investigación, así como para su desarrollo. Los modelos se justifican por su aplicabilidad para mejorar la gestión del sistema que describen. Por lo general, proporcionan información cuantitativa a partir de la cual decisiones tales como el calendario de cultivos, riegos, fertilización, protección del cultivo, control del clima, etc., pueden ser tomadas a nivel de campo. Por otra parte, la información puede ser evaluada a partir de estimaciones como el potencial de rendimiento de un cultivo, las necesidades de agua, fertilizantes o pérdidas (Gary, 1999).

En la práctica de la horticultura, los modelos matemáticos permiten evaluar estrategias sobre el posible manejo de cultivos en invernadero, sin la necesidad de realizar experimentos costosos. En la producción de hortalizas en

ambientes protegidos los modelos son necesarios si uno desea realizar alguna optimización en la producción, ya sea para tratar de controlar el clima de un invernadero o el ambiente de la raíz del cultivo (Gary, 1999)

A partir de los 80's, la modelación de cultivos se ha convertido en una importante herramienta de investigación en la horticultura, así como en otras áreas de la producción vegetal; una de las razones es la versatilidad de esta técnica. La horticultura es un ámbito en el que la predicción del rendimiento, evaluación de políticas, o la optimización de los procesos pueden ser muy importantes, y se caracteriza por una gran cantidad de sistemas de cultivos, frutales, hortalizas y especies ornamentales (Gary *et al.*, 1998).

Para los últimos años se han desarrollado varios modelos matemáticos para diferentes hortalizas cultivadas en invernadero. El número de hortalizas estudiadas para el año de 1998 asciende a 25 especies frutales, 23 especies vegetales cultivados a campo abierto, 20 ornamentales y cuatro especies vegetales cultivadas en invernadero, de estas últimas la mitad son para tomate (Gary *et al.*, 1998).

En lo que respecta a otras hortalizas importantes producidas en invernadero, son el pepino y la lechuga. En el cultivo de pepino se han hecho trabajos sobre modelaje de distribución de materia seca en hojas, tallos, raíz y frutos, encontrando resultados satisfactorios, ya que los modelos desarrollados mostraron datos similares a los datos reales obtenidos de experimentos de cultivo de pepino (Heuvelink y Marcelis, 1989; Marcelis, 1994).

Por su parte, en el cultivo de lechuga se han realizado numerosos experimentos ya que son más simples y por lo tanto más fáciles de analizar

(López-Cruz *et al.*, 2004). El proyecto Europeo NICOLET (Nitrate Control in Lettuce) se orientó al desarrollo de un modelo dinámico de acumulación de nitratos en lechuga (Ioslovich *et al.*, 2009). Seginer *et al.* (1998), describen un modelo para calcular el contenido de nitratos en el cultivo de lechuga. A partir de este modelo se han realizado diversos estudios alrededor de Europa en diferentes países (Seginer *et al.*, 2004; Broadley *et al.*, 2003; McKenna, 2000; Seginer *et al.*, 1999, Seginer *et al.*, 1998). Se han realizado diferentes ajustes y modificaciones al modelo NICOLET básico (Seginer *et al.*, 2004; López-Cruz *et al.*, 2003; McKenna, 2000; Seginer *et al.*, 1999). Por su parte, López-Cruz *et al.* (2004), realizaron un análisis de sensibilidad del nuevo modelo denominado NICOLET B3. Por lo tanto, para el presente trabajo se plantearon los siguientes objetivos e hipótesis:

II. OBJETIVO GENERAL

- Validar el modelo matemático NICOLET B3 con datos de un cultivo de lechuga desarrollado bajo condiciones de invernadero.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaboración de un programa de simulación dinámica que permita describir el crecimiento del cultivo de lechuga bajo condiciones de invernadero.
- Análisis de crecimiento del cultivo de lechuga mediante peso fresco y seco de la parte aérea.

- Recolección y análisis de datos climáticos de un invernadero a lo largo del desarrollo del cultivo.
- Validación del modelo mediante el uso del coeficiente de correlación ajustado R^2 .

III. HIPÓTESIS

El modelo matemático NICOLET B3 será capaz de simular el crecimiento del cultivo de lechuga bajo condiciones de invernadero expresado en peso fresco y seco de la parte aérea con una precisión mínima del 95% (R^2 mínimo de 0.95).

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Modelos Matemáticos

Los modelos matemáticos son herramientas poderosas para poner a prueba las hipótesis, para sintetizar los conocimientos, para describir y comprender los sistemas complejos y para comparar diferentes escenarios (Marcelis *et al.*, 2006). Así mismo los modelos en la agricultura son un conjunto de ecuaciones matemáticas que representan las reacciones que ocurren dentro de la planta así como las interacciones entre la planta y su ambiente (Cheeroo-Nayamuth, 1999), por lo tanto, los modelos de crecimiento y desarrollo son herramientas que sirven para obtener información básica de la planta y sus interacciones con el ambiente, maximizando de esta manera el uso de los recursos en invernadero, así como para definir la mejor forma de manejo del cultivo (Lopes *et al.*, 2004). Estos modelos pueden ser utilizados como sistemas de apoyo en la toma de decisiones, en el control climático del invernadero y en la predicción y planificación de la producción (Marcelis *et al.*, 2006). La modelación puede facilitar la integración de conocimiento de diferentes campos, tales como la fisiología del cultivo, física del medio ambiente y entomología, útil para proporcionar herramientas para la investigación y aplicación en el control y toma de decisiones (Jones, 1998).

Generalmente, los modelos matemáticos se dividen en tres tipos: modelos empíricos, modelos mecanicistas o mecanísticos y modelos teleonómicos. Los modelos empíricos son descripciones directas de datos y proporcionan relaciones observables entre las variables de un sistema o fenómeno, sin proporcionar alguna explicación de los mecanismos subyacentes. Estos modelos son un poderoso medio para describir y resumir los datos. Ejemplos de ellos son los modelos de regresión simple y múltiple, las redes neuronales, los modelos difusos. Los modelos teleonómicos son aplicables a comportamientos dirigidos por objetivos y se formulan en términos de metas. Los modelos explicativos o mecanicistas son modelos determinísticos. Normalmente, un modelo mecanicista es definido mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias, las cuales describen el comportamiento de las variables de estado del sistema, aquellas variables que representan las propiedades relevantes o atributos del sistema considerado. Los modelos explicativos son más apropiados para expresar hipótesis matemáticamente y proporcionan así una descripción cuantitativa y una explicación de los procesos más importantes que ocurren en un sistema biológico. Este enfoque se ha aplicado exitosamente durante los últimos años en la modelación de procesos de crecimiento de cultivos (Thornley y Johnson, 2000).

El desarrollo de un modelo matemático mecanicista requiere de suficiente comprensión de los procesos biológicos, fisiológicos, químicos y físicos de un sistema biológico. Por lo que el uso de un modelo mecanicista demanda análisis, calibración y validación adecuados (López-Cruz *et al.*, 2005).

Según López-Cruz (2003); López-Cruz *et al.* (2005), un modelo de crecimiento de un cultivo bajo condiciones de invernadero se define mediante una ecuación diferencial no-lineal de la siguiente forma:

$$\dot{x} = f(x, u, p), \quad \dot{x}(t_0) = \beta$$

Donde $x \in R^n$, $u \in R^m$, $p \in R^q$ y $\beta \in R^u$.

El vector de estados (x) contiene las variables que caracterizan el cultivo como peso seco, número de frutos, área foliar, etc., el vector de las entradas (u) contiene variables tales como temperatura, CO₂ y radiación fotosintéticamente activa. El vector (p) representa los parámetros o constantes físicas del modelo. El conjunto de ecuaciones dinámicas está definido por ecuaciones ordinarias de primer grado. Dado que f es un vector de funciones no-lineales, el modelo de crecimiento no tiene solución analítica y debe ser resuelto mediante integración numérica o simulación digital.

4.2 Modelos Matemáticos en la Horticultura

En la práctica de la horticultura, los modelos matemáticos permiten evaluar estrategias sobre el posible manejo de cultivos en invernadero, sin la necesidad de realizar experimentos costosos. En la producción de hortalizas en ambientes protegidos los modelos son necesarios si uno desea realizar alguna optimización en la producción. Por ejemplo, para tratar de controlar el clima de un invernadero o el ambiente de la raíz del cultivo se requieren modelos matemáticos de ambos procesos (Gary, 1999).

A partir de los 80's, la modelación de cultivos se ha convertido en una importante herramienta de investigación en la horticultura, así como en otras áreas de la producción vegetal; una de las razones es la versatilidad de esta técnica. La horticultura es un ámbito en el que la predicción del rendimiento, evaluación de políticas, o la optimización de los procesos pueden ser muy importantes; ésta se caracteriza por una gran cantidad de sistemas de cultivos, frutales, hortalizas y especies ornamentales (Gary *et al.*, 1998).

Los modelos de hortalizas más estudiados han tenido el objetivo no solo de sintetizar el conocimiento del sistema e incrementarlo, sino mediante una simplificación del modelo original se han aplicado los modelos en estudios de control óptimo de la producción en invernaderos. Sin embargo se requieren modelos más simples para que no solo una solución analítica de un problema de optimización dinámica sea posible, sino además una solución numérica en un tiempo razonable de computación (López-Cruz *et al.*, 2005).

Algunas aplicaciones para los modelos de crecimiento de hortalizas en invernadero son: investigación científica, educación y manejo de cultivos. Es en la educación e investigación en donde estos modelos han tenido el mayor impacto de aplicación, mientras que en la toma de decisiones se espera mayor desarrollo, conocimiento y confianza de los usuarios para que sean ampliamente utilizados (López-Cruz *et al.*, 2005).

4.3 Modelos Sobre Tomate

En lo que se refiere al cultivo de tomate se han desarrollado varios modelos de crecimiento a lo largo de los años, que van desde algunos muy simples hasta muy complejos.

Un modelo determinístico de crecimiento de tomates (*Lycopersicon esculentum* Mill.) de invernadero escrito en lenguaje Pascal fue desarrollado basado en un modelo de asimilación de la hoja, más una teoría de respiración y una teoría del rango de fotosíntesis, lo cual es controlado por las condiciones ambientales y los contenidos de carbohidratos en las hojas. El modelo fue aplicado para estimar el efecto del enriquecimiento de CO₂ sobre la producción de frutos de tomate (Kano y Van Bavel, 1988).

Un modelo para simular dinámicamente la distribución de materia seca entre hojas, tallo, raíz y frutos de las plantas fue descrito por Heuvelink y Marcelis (1989), para frutos individuales en el caso de pepino (*Cucumis sativus* L.) y racimos de frutos en el caso de tomate. En tomate el peso seco potencial y el tiempo de floración hasta la cosecha de los frutos decrece con el aumento de la temperatura. Los resultados de su simulación de la distribución de materia seca entre las hojas, tallos y frutos de tomate correspondieron razonablemente bien con los datos medidos en el experimento.

El modelo TOMGRO para el cultivo de tomate fue usado para calcular la fotosíntesis neta del cultivo, el cual integra el modelo Acock para el cálculo de la misma. Los resultados muestran que el modelo es inadecuado para describir el balance de CO₂ del agrosistema del invernadero, sin embargo, se determinó

que puede ser usado en un modelo más complejo para describir el crecimiento y desarrollo (Zekki *et al.*, 1999).

Existen otros modelos para el cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero, uno de ellos es el TOMPOUSSE, que predice la producción para los cultivos de tomate (Abreu y Meneses, 2000).

Dai *et al.*, (2006), desarrollaron un modelo relativamente simple para predecir la producción de biomasa del dosel y cosecha de frutos para tres cultivos en invernadero: melón, tomate y pepino. Para este trabajo usaron la radiación solar, temperatura del aire interno del invernadero, datos del cultivo, densidad de plantas, y temperatura mínima, máxima y óptima para el desarrollo del cultivo. Los resultados muestran que el modelo predice satisfactoriamente la producción de biomasa del dosel y la cosecha de los frutos para los tres cultivos.

Por otra parte, Dimokas *et al.* (2008), proponen un nuevo modelo modificado del modelo original TOMGRO, haciendo adaptaciones en las que midieron datos como desarrollo del cultivo, crecimiento y efectos del clima. El modelo fue validado y calibrado en el cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero, ya que se observó una buena relación entre los datos medidos y simulados tomando en cuenta el desarrollo del cultivo, la biomasa y la producción de frutos. Tal experimento fue desarrollado para las condiciones del mediterráneo, en el este de Grecia.

4.4 Modelos Sobre Pimiento

Ngouajio *et al.* (2003), desarrollaron un modelo simple con estimaciones no destructivas de los frutos para la predicción de la cosecha en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum L.*). El modelo fue derivado de la fórmula del volumen de una esfera como punto de partida, relacionando el largo y ancho del fruto de pimiento a su volumen. Los resultados muestran que la exactitud del modelo es comparable con la de otros modelos desarrollados anteriormente, además de que es simple y fácil de usar en campo.

Por otro lado, Verlinden *et al.* (2005), desarrollaron un modelo para predecir la época de cosecha en el cultivo de pimiento basándose en el color y condiciones climáticas como la radiación solar y temperatura del invernadero. Realizaron predicciones de cosecha con éxito en tiempos de una o dos semanas.

Marcelis *et al.* (2005), desarrollaron un modelo de cómo las relaciones planta-nutriente pueden ser utilizadas en un modelo para cultivos de invernadero tomando como ejemplo el cultivo de pimiento. A partir de datos del clima, el modelo simula el desarrollo de órganos de la planta, transpiración, y asimilación de agua y nutrientes.

Marcelis *et al.* (2006), describen un modelo mecanicista para el cultivo de pimiento donde trabajan con cuestiones como la expansión del área foliar, partición de materia seca y la validación del mismo. La validación del modelo fue en base a seis experimentos realizados en los países bajos y en Francia. La simulación de la materia seca así como su particionamiento en diferentes

órganos se mostró acertada entre los resultados del modelo y los datos medidos de los diferentes experimentos.

4.5 Modelos Sobre Pepino

Nederhoff *et al.* (1989), describen experimentos y simulaciones para validar el submodelo de fotosíntesis en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en invernadero. Los experimentos fueron desarrollados a diferentes concentraciones de CO₂, intensidades de luz y temperaturas, generando buenos resultados.

Un modelo para simular dinámicamente la distribución de materia seca entre hojas, tallo, raíz y frutos de las plantas fue descrito por Heuvelink y Marcelis (1989), para frutos individuales en el caso de pepino (*Cucumis sativus* L.) y racimos de frutos en el caso de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.). Para el caso de pepino se encontró que la distribución de materia seca entre los diferentes órganos como hojas, tallos y raíz es independiente de la carga del fruto. En la simulación encontraron resultados muy aceptables en cuanto a la distribución de materia seca entre los diferentes órganos comparados con los datos medidos en el experimento.

Además, Liebig (1989), usando ecuaciones derivadas de análisis de regresión múltiple, logró generar un modelo para predecir la producción semanal del número de frutos en el cultivo de pepino.

Chamont (1993), propuso un modelo simple de la distribución de carbono para la simulación del desarrollo de la raíz en el cultivo de pepino. Este modelo se basó en el modelo de simulación dinámica de tomate (TOMGRO).

Marcelis (1994), desarrolló un modelo dinámico para la simulación diaria de la distribución de materia seca entre las partes vegetativas y generativas de la planta, así como la distribución entre los frutos individuales de un cultivo de pepino bajo condiciones de invernadero. Los resultados del modelo fueron satisfactorios, ya que los datos simulados de la distribución de materia seca entre los frutos y las partes vegetativas comparados contra los datos medidos fueron aceptables.

Marcelis y Gijzen (1998), desarrollaron un modelo conocido como KOSI para predecir semanalmente el peso fresco de cosecha de los frutos de pepino así como su calidad. Las salidas del modelo son el peso fresco total de frutos de cosecha por semana, número de frutos, edad del fruto individual y porcentaje de frutos de segunda clase.

También se han utilizado sistemas lineales para la modelación del cultivo de pepino, ya que al modelar la arquitectura de la planta con sistemas lineales puede ser de gran ayuda para seleccionar adecuadamente los cultivares y las técnicas de manejo del cultivo (Higashide *et al.*, 2000; Kahlen, 2006) y son sistemas relativamente fáciles de usar.

4.6 Modelos Sobre Lechuga

Existen diferentes modelos propuestos para predecir el crecimiento del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.), que por ser un cultivo relativamente simple, se ha utilizado ampliamente en estudios de optimización y control (López-Cruz, 2003).

Van Henten (1994), propuso un modelo de crecimiento de lechuga para estudios de optimización de control de clima en invernadero. El modelo describe la dinámica de comportamiento de dos variables de estado: peso seco no estructural y peso seco estructural, los que son afectados por la radiación fotosintéticamente activa, la concentración de dióxido de carbono y la temperatura dentro del invernadero. Este modelo fue validado comparando las simulaciones con datos obtenidos de dos experimentos. Así mismo, Van Henten y Van Straten (1994), realizaron un análisis de sensibilidad del mismo.

Pearson *et al.* (1997), desarrollaron un modelo mecanístico que predice los efectos de los cambios del ambiente sobre el crecimiento, producción y madurez de la lechuga.

Willcutts *et al.* (1998), desarrollaron una comparación de tres modelos matemáticos para determinar el óptimo de los rangos de fertilización de nitrógeno en diferentes variedades del cultivo de lechuga.

Zhang *et al.* (2004), trabajaron en el desarrollo de un modelo mecanístico dinámico para predecir la acumulación de materia seca en lechuga así como la concentración de nitratos durante el desarrollo del cultivo. Así mismo se han realizado trabajos de modelación en la cinética de la absorción de nutrientes en

el cultivo de lechuga, especialmente nitrógeno, mismos que se han calibrado y validado (Zhang *et al.*, 2008).

Además se han utilizado las redes neuronales artificiales (ANN por sus siglas en inglés) en la modelación del crecimiento y desarrollo en el cultivo de lechuga. Estos modelos pueden predecir la producción del cultivo de lechuga en invernadero con gran exactitud, tomando en cuenta el peso fresco y el desarrollo de la planta (Lin, 2002). Aunque por otra parte, Cordova y Yu (2009), nos dicen que las redes neuronales no pueden igualar sistemas no lineales exactamente, sin embargo, con algunas modificaciones se pueden aplicar satisfactoriamente en la modelación del crecimiento de lechuga en invernadero.

4.6.1 NICOLET

En su énfasis por mejorar el control de nitratos en el cultivo de lechuga en los países europeos se desarrolló un modelo simple (Nicolet) que tiene como base dos ecuaciones diferenciales como variables de estado (contenido de carbono estructural y contenido de carbono no estructural) para describir la concentración de nitratos en lechuga cuando la disponibilidad de nitratos es ilimitado (Seginer *et al.*, 1998). Posteriormente se realizó un análisis de sensibilidad y calibración al mismo (Van Straten *et al.*, 1999). Para este modelo se propusieron algunas modificaciones para poder describir el cultivo cuando la disponibilidad de nitratos es limitada (Seginer *et al.*, 1999). Se han propuesto varias modificaciones para el modelo original NICOLET (McKenna, 2000; Yarkoni y McKenna, 2000). López-Cruz *et al.* (2003), desarrolló un estudio de optimización para el control de nitratos en lechuga, también Broadley *et al.*

(2003), realizaron un estudio sobre control de nitratos utilizando el modelo NICOLET. En un estudio posterior se realizó un análisis de sensibilidad del modelo NICOLET B3 (López-Cruz *et al.*, 2004). Por su parte, Seginer (2003), propone una modificación del modelo NICOLET en el que aumenta un estado de carbono al modelo original y propone dos ecuaciones diferenciales más para los balances de nitrógeno; posteriormente se proponen nuevas modificaciones para simular de forma más precisa los cambios de nitrógeno y contenido de agua (Seginer *et al.*, 2004a). Linker *et al.* (2004), realizan la descripción y calibración del modelo en el que denominan al tercer estado como carbono de exceso. De igual forma se han hecho más mejoras en el modelo NICOLET para simular de mejor manera el contenido de nitratos en el cultivo de lechuga, así como para realizar mejor toma de decisiones en el manejo del nitrógeno para el desarrollo del cultivo (Seginer *et al.*, 2004). Se han realizado evaluaciones para determinar el funcionamiento del modelo en términos de corto y largo tiempo (Mathieu *et al.*, 2006). Ioslovich *et al.* (2009) han realizado análisis de sensibilidad sobre los parámetros del modelo.

4.7 Otros Modelos

Se han realizado modelos para la fotosíntesis del dosel de varios cultivos como tomate pepino y pimiento, comparando los mismos entre sí, teniendo aplicaciones prácticas en la horticultura (Nederhoff y Vegter, 1994).

El modelo HORTISIM para la producción de cultivos y clima en invernadero contiene siete submodelos (clima, clima del invernadero, suelo,

cultivo, manejo del invernadero, manejo del suelo, manejo del cultivo) y además un manejador de los procesos de simulación (el motor). Con este modelo se realizaron diversos estudios sobre los diferentes campos de simulación, y con diferentes cultivos; se mostraron buenos resultados de las simulaciones con respecto a los datos obtenidos de los diferentes experimentos realizados en diferentes lugares (Gijzen *et al.*, 1998).

También se han desarrollado modelos para determinar la evapotranspiración en el cultivo de lechuga. El modelo calcula la transpiración del cultivo y evaporación del suelo, y también el desarrollo de la cobertura del suelo y la radiación diaria interceptada por el dosel. Los resultados obtenidos del modelo son muy buenos comparados con los medidos directamente de campo (Gallardo *et al.*, 1996).

Hyun *et al.* (2003), usaron la ecuación expolinear del crecimiento para modelar el cultivo de crisantemo (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) a lo largo de un año. Obtuvieron resultados adecuados, concluyendo que la ecuación expolinear de crecimiento es una herramienta útil.

Lin (2004), modeló los procesos de maduración del cultivo de chile (*Capsicum annuum* L.) en invernadero, ya que la cosecha de los mismos es irregular, causando dificultades para los operadores del invernadero en la cosecha y empaclado para el envío.

Otro cultivo en el que se han realizado trabajos sobre modelación y simulación recientemente es en algodón (*Gossypium hisutum*) en el sur de Texas. Las investigaciones se enfocaron en la obtención de parámetros para el desarrollo de modelos de cultivos (Ko *et al.*, 2009).

4.8 Análisis de Sensibilidad de Modelos

Para los modelos matemáticos se realizan procesos denominados análisis de sensibilidad que sirven para evaluar el efecto de los parámetros y entradas del modelo sobre las salidas. Dichos procesos no se aplican para todo el periodo de crecimiento del cultivo (Heuvelink, 1999).

Van Straten *et al.* (1999), realizaron trabajos experimentales para calibrar y realizar un análisis de sensibilidad de un modelo dinámico para el control de nitrato en lechuga.

Un análisis de sensibilidad llevado a cabo para el modelo NICOLET B3, que es una modificación del modelo NICOLET, en el que usaron como variables de entrada datos del clima dentro de un invernadero localizado en Chapingo, México, así como variables no correlacionadas, mostró que tres parámetros afectan en mayor medida el comportamiento de dicho modelo, y que algunos parámetros no tienen tal relevancia por lo que pueden continuar con sus valores originales, dando como resultante una simplificación de la estructura del modelo original (López-Cruz *et al.*, 2004).

4.9 Calibración y Validación de Modelos

La calibración de un modelo matemático es el proceso de modificación de los valores de los parámetros del modelo para obtener un mejor ajuste entre la predicción (simulación) y los datos observados. Generalmente, los parámetros sujetos de calibración son aquellos que presentan incertidumbre, que afectan el comportamiento del modelo en forma más sensible, y que

afectan el comportamiento del modelo en forma tal que se obtiene mejor ajuste entre las mediciones y datos simulados; de forma práctica son los parámetros que un análisis de sensibilidad mostró como más importantes para los estados y/o salidas del modelo (López-Cruz, 2004). En forma general, calibración es cualquier procedimiento que permite extraer información cuantitativa con respecto a los parámetros del modelo a partir de observaciones o mediciones usando un modelo de simulación completo (Metselaar, 1999).

Por otra parte, la validación de modelos se puede definir como un procedimiento para establecer la utilidad de un modelo para una aplicación (Metselaar, 1999). Metselaar sugiere los criterios usados en la calibración de un modelo para evaluar su calidad de predicción, ya que, lo que se desea es lograr una identidad $M_i=P_i$ entre mediciones (M_i) y predicciones (P_i), donde el subíndice denota la *i-ésima* instancia. La utilidad de un modelo se puede definir en términos de la calidad predictiva relativa. Así mismo existen varias medidas de la calidad predictiva de un modelo (López-Cruz, 2004).

Hussain *et al.* (2008), validaron un modelo mecanístico en el cultivo de zanahoria usando el coeficiente de correlación ajustado R^2 , el cual también fue usado por Zekki *et al.* (1999). De la misma forma, también se han utilizado los intervalos de confianza para validar modelos como lo describen Van Henten y Van Straten (1994).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Descripción del Modelo

El modelo NICOLET B3 (López-Cruz *et al.*, 2004; López-Cruz *et al.*, 2003) está definido por dos ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\frac{dM_{Cv}}{dt} = F_{Cav} - h_g F_{Cm} - F_{Cg} - F_{Cvs} \quad (1)$$

$$\frac{dM_{Cs}}{dt} = F_{Cvs} - (1 - h_g) F_{Cm} \quad (2)$$

donde M_{Cv} [mol(C)m⁻²(suelo)] representa la variable de estado carbono en las vacuolas y M_{Cs} [mol(C)m⁻²(suelo)] representa la cantidad de carbono en la estructura. h_g [adimensional] es una función de inhibición del crecimiento de la planta. El flujo de carbono F_{Cm} [mol(C)m⁻²(suelo)s⁻¹] del aire a las vacuolas (tasa de fotosíntesis) se calcula con la función:

$$F_{Cav} = p\{I, C_{Ca}\} f\{M_{Cs}\} h_p\{C_{Cv}\} \quad (3)$$

donde la función de fotosíntesis total sin inhibición del dosel $p\{I, C_{Ca}\}$ [mol(C)m⁻²(suelo)s⁻¹] depende de las variables de entrada radiación PAR (I ,

Wm^{-2}) y concentración de CO_2 (C_{Ca} , ppm), y es calculada con la ecuación hiperbólica:

$$p\{I, C_{Ca}\} = \frac{\varepsilon I \sigma (C_{Ca} - C_c)}{\varepsilon I + \sigma (C_{Ca} - C_c)} \quad (4)$$

con los parámetros de eficiencia fotosintética ε [$\text{mol (C)mol}^{-1}(\text{PAR})$], el parámetro de conductancia foliar de CO_2 σ [ms^{-1}], y la concentración de CO_2 en el punto de compensación (C_c , ppm).

En la ecuación (3) la intercepción de la radiación por el dosel del cultivo $f\{M_{Cs}\}$ [adimensional] es descrita por una función exponencial clásica (Goudriaan y Van Laar, 1994):

$$f\{M_{Cs}\} = 1 - \exp(-\alpha M_{Cs}) \quad (5)$$

donde α [$\text{m}^2(\text{suelo})\text{mol}^{-1}(\text{C})$] es el coeficiente de extinción de la radiación a través del dosel. Esta ecuación se usa para calcular tanto la tasa de fotosíntesis como la de crecimiento. La función de inhibición de la tasa de fotosíntesis $h_p\{C_{Cv}\}$ [adimensional] en la ecuación (3) no es calculada por una función exponencial como sucede en el modelo NICOLET, sino por:

$$h_p\{C_{Cv}\} = \frac{1}{1 + \left(\frac{(1-b)\Pi_v}{\Pi_v - \gamma C_{Cv}} \right)^{Sp}} \quad (6)$$

donde la concentración de carbono en términos de las variables de estado se calcula por $C_{Cv} = \frac{M_{Cv}}{\lambda M_{Cs}}$ [mol(C)m⁻³]. Con los parámetros: coeficiente de equivalencia osmótica de carbono γ [m³Pa mol⁻¹(C)], coeficiente del cálculo de la concentración de carbono λ [m⁻³mol⁻¹(C)], pendiente de la función de inhibición de fotosíntesis s_p [adimensional], y pendiente frontera de la función de inhibición b_p [adimensional]. La presión osmótica de las vacuolas Π_v [Pa] relaciona la concentración de nitrógeno C_{Nv} [mol(N)m⁻³] con la concentración de carbono en las vacuolas y establece una correlación negativa entre las concentraciones de azúcares y nitratos mediante la ecuación:

$$\beta C_{Nv} + \gamma C_{Cv} = \Pi_v \quad (7)$$

donde β [m³Pa mol⁻¹(N)] es un coeficiente de equivalencia osmótica. El flujo de carbono producido por la respiración de mantenimiento F_{Cm} [mol(C)m⁻²(suelo)s⁻¹], que aparece en las ecuaciones (1) y (2) depende de la temperatura (T , °C) y se calcula mediante la ecuación:

$$F_{Cm} = M_{Cs} e^{\{T\}} \quad (8)$$

donde $e^{\{T\}}$ [s⁻¹] representa un modelo exponencial para la respiración de mantenimiento dependiente de la temperatura (Goudriaan y Van Laar, 1994).

Dicho modelo exponencial se considera para calcular la fracción de carbono estructural usada por la planta en respiración de mantenimiento. La ecuación es:

$$e\{T\} = K \exp(c(T - T^*)) \quad (9)$$

donde $k [s^{-1}]$ representa el coeficiente de respiración de mantenimiento, y $c [^{\circ}C^{-1}]$ la constante en el término exponencial de la función de respiración de mantenimiento. Normalmente el valor de este parámetro es $c = \ln(2)/10 = 0.0693$ (Goudriaan y Van Laar, 1994). $T^* [^{\circ}C]$ es la temperatura de referencia.

La función de crecimiento $F_{C_{vs}} [mol(C)m^{-2}(suelo)s^{-1}]$, usada en las ecuaciones (1) y (2), calcula la cantidad de carbono empleada por la planta para formar nueva biomasa suponiendo una disponibilidad ilimitada de nutrientes:

$$F_{C_{vs}} = g\{T\}f\{M_{Cs}\}h_g\{C_{Cv}\} \quad (10)$$

donde $g\{T\} [mol(C)m^{-2}(suelo)s^{-1}]$, es la tasa de crecimiento sin inhibición de un dosel cerrado, la cual es una función de la temperatura (T). Ésta es calculada mediante la expresión:

$$g\{T\} = ve\{T\} \quad (11)$$

donde $e\{T\}$ es la expresión (9) afectada por el coeficiente de tasa de crecimiento sin inhibición de un dosel cerrado v [$\text{mol(C)}\text{m}^{-2}(\text{suelo})$]. El término $f\{M_{Cs}\}$ está dado por (5).

A diferencia del modelo NICOLET, que utiliza una función exponencial para reducir el crecimiento cuando por condiciones ambientales la cantidad de carbono estructural tiende a cero, en el modelo NICOLET B3 la función de inhibición del crecimiento $h_g\{C_{Cv}\}$ [adimensional], la cual es igual a la unidad cuando no existe efecto inhibitorio, es calculada mediante la función:

$$h_g\{C_{Cv}\} = \frac{1}{1 + \left(\frac{b_g \Pi_v}{rC_{Cv}}\right)^{s_g}} \quad (12)$$

donde s_g [adimensional] es la pendiente de la función de inhibición y b_g [adimensional] es la frontera de la función de inhibición de crecimiento. El flujo de carbono producido por la respiración de crecimiento F_{Cg} [$\text{mol(C)}\text{m}^{-2}(\text{suelo})\text{s}^{-1}$], que aparece en (1), es calculado proporcionalmente a la tasa de crecimiento F_{Cvs} , de acuerdo con:

$$F_{Cg} = \theta F_{Cvs} \quad (13)$$

donde θ [adimensional] es un coeficiente de respiración de crecimiento. Las funciones de inhibición ($h_g\{C_{Cv}\}$ y $h_p\{C_{Cv}\}$) evitan que las predicciones del modelo den valores negativos del contenido de carbono en las vacuolas,

cuando se presenta una carencia de luz durante un periodo largo (López-Cruz *et al.*, 2003; McKenna, 2000). Otra diferencia importante del modelo NICOLET B3 con respecto al modelo NICOLET es la adición del término $(h_g F_{C_m})$ en las ecuaciones (1) y (2) que dan cuenta del carbono en la estructura de acuerdo con la respiración de mantenimiento cuando el carbono en las vacuolas es muy bajo (López-Cruz *et al.*, 2003; McKenna, 2000). Cuando $h_g \{C_{C_v}\} = 1$ no hay inhibición, y entonces las ecuaciones (1) y (2) son iguales a las del modelo NICOLET.

La materia seca total M_{DM} [kg(m.s.)m⁻²(suelo)] es una salida del modelo que se calcula a partir de las variables de estado usando la ecuación algebraica:

$$M_{DM} = \eta_{OMC} (M_{C_v} + M_{C_s}) + \eta_{MMN} \left(\frac{\lambda \Pi_v}{\beta} M_{C_s} - \frac{\gamma}{\beta} M_{C_v} \right) \quad (14)$$

donde η_{OMC} [kg(m.s.)mol⁻¹(C)] es la masa de materia orgánica por mol de carbono y η_{MMN} [kg(m.s.)mol⁻¹(N)]. El contenido de nitratos (NO₃, ppm) es otra salida del modelo, calculada con la ecuación:

$$C_{NO_3} = 10^6 \eta_{NO_3N} C_{NO_3N} \quad (15)$$

donde η_{NO_3N} [kg(NO₃)mol⁻¹(N)] es el peso de nitratos contenido en un mol de átomos de nitrógeno. La función:

$$C_{NO3N} = C_{Nv} \frac{1 - DFR}{1000} \quad (16)$$

[mol(NO₃)kg⁻¹(m.s.)] calcula los moles de nitrato por unidad de peso seco. El volumen vacuolar es:

$$V_V = \lambda M_{Cs} [\text{m}^3\text{m}^{-2}(\text{suelo})] \quad (17)$$

5.2 Desarrollo Experimental del Cultivo de Lechuga

El desarrollo del experimento fue realizado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila cuyas coordenadas geográficas son: 25° 22' Latitud Norte, 101° 00' Longitud Oeste, con una altitud de 1760 msnm, en un invernadero del Departamento de Horticultura. Las características del invernadero son tipo túnel con cubierta plástica de polietileno y ventanas laterales, sin control del clima en el interior del mismo, por lo que las variaciones de temperatura, radiación y CO₂ fueron naturales. El cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) variedad "Great Lakes" se desarrolló del 24 de marzo de 2010 al 7 de mayo de 2010. Las plantas se transplantaron en un sistema de cultivo sin suelo, colocándose en bolsas de plástico de 4L con una mezcla 2:1 de sustrato tipo *perlita expandida* y *peat moss* respectivamente. Las plantas fueron colocadas sobre una cubierta plástica de color negro y distribuidas en cinco camas, se utilizó un sistema de riego dirigido mediante el uso de microgoteros conectados a una red principal. Se utilizó una solución nutritiva comercial (FertiDrip 20-20-20) a un pH

aproximado de 6.5 y una conductividad eléctrica de 1.4 mS. La densidad de plantación fue de 19.6 plantas por m².

A lo largo del desarrollo del experimento se realizaron dos muestreos semanales (cada tres o cuatro días) en el que se tomaron 5 plantas seleccionadas completamente al azar del cultivo, se registró la hora y fecha de muestreo así como el peso fresco de la parte aérea. El peso seco se determinó después de secar a 80°C durante 48 horas en horno de secado.

5.3 Variables de Entrada Usadas en la Simulación

Las entradas del modelo utilizadas para llevar a cabo la simulación fueron las variables climáticas: radiación fotosintéticamente activa (PAR, Wm⁻²), el contenido de dióxido de carbono en el aire (CO₂, ppm) y temperatura del aire (°C) medidas al interior del invernadero. Para la medición y recolección de estos datos se utilizaron una serie de sensores que se colocaron en el centro del experimento a la altura del cultivo, los cuales midieron y registraron los datos climáticos cada 15 minutos durante el periodo en el que se desarrolló el experimento del cultivo de lechuga. Para medir y coleccionar los datos del CO₂ se utilizó un data logger portátil modelo K33 ELG (CO₂ Meter), para la radiación PAR se usó un sensor Quantum LI-190 (LI-COR inc.) y para la temperatura se usó un sensor 1400-101 (LI-COR inc.). Estos dos últimos se conectaron a un data logger modelo LI-1400 (LI-COR inc.) el cual almacenó los datos medidos.

5.4 Programación y Simulación

Dado que el sistema de ecuaciones matemáticas que representa el modelo de un cultivo difícilmente tiene solución analítica se requiere del uso de un programa de computación o modelo de simulación (Van Ittersum *et al.*, 2003); por lo que, para llevar a cabo la programación del modelo se utilizó la herramienta “Simulink” del software MATLAB R2009a de MathWorks inc. Para correr la simulación se usaron las variables de entrada CO₂ (ppm), radiación PAR (Wm⁻²) y temperatura (°C) obtenidas del experimento del cultivo de lechuga; además, los valores de los parámetros utilizados en la programación fueron tomados de López-Cruz *et al.* (2003), Loslovich *et al.* (2009) (Tabla I).

La simulación del modelo se realizó utilizando el mismo periodo de tiempo en que se mantuvo el cultivo de lechuga en el invernadero, específicamente, al mismo periodo de obtención de muestras, pero expresado en segundos. Para la simulación en “Simulink” se utilizó el algoritmo de integración *ode45*. Además se incluyeron los tiempos exactos de muestreo en la simulación para comparar con los datos reales obtenidos de los muestreos realizados.

5.5 Salidas del Modelo

Las salidas del modelo son peso fresco de parte aérea y peso seco de parte aérea expresados en Kg m⁻².

Tabla I. Valores de los parámetros utilizados durante la simulación del modelo
NICOLET B3 y su significado.

Parámetros	Valor	Unidades	Significado
a	1.7	m^2 (suelo) $mol^{-1}(C)$	Extinción de radiación a través del dosel
b_g	0.2	Adimensional	Inhibición de la función de crecimiento
b_p	0.8	Adimensional	Inhibición de la función de fotosíntesis
C	0.0693	$^{\circ}C^{-1}$	Término exponencial de la función de mantenimiento
C_c	0.0011	mol (C) m^{-3}	Valor de compensación de CO_2
k	0.26e-6	s^{-1}	Coefficiente de respiración de mantenimiento
T^*	20	$^{\circ}C$	Temperatura de referencia
β	6	m^3Pa mol^{-1} (N)	Coefficiente de equivalencia osmótica de N
γ	0.61	m^3Pa mol^{-1} (C)	Coefficiente de equivalencia osmótica de C
ε	0.04-0.07	mol (C) mol^{-1} (PAR)	Parámetro de eficiencia fotosintética
θ	0.3	Adimensional	Constante de respiración de crecimiento
λ	1/1200	m^3 mol^{-1} (C)	Parámetro para el cálculo de la concentración de C
ν	13	mol (C) m^{-2} (suelo)	Coefficiente de la tasa de crecimiento sin inhibición
σ	1.4e-3	m s^{-1}	Parámetro de conductancia foliar de CO_2
s_p	10	Adimensional	Pendiente de la función de inhibición de fotosíntesis
s_g	10	Adimensional	Pendiente de la función de inhibición
$Pldens$	19.6	Plantas m^{-2}	Densidad de plantas
Π_v	580	Pa	Presión osmótica de las vacuolas
η_{OMC}	0.03	Kg (MS) mol^{-1} (C)	Materia orgánica por cantidad de carbono
η_{MMN}	0.148	Kg (MS) mol^{-1} (N)	Material mineral por cantidad de nitrato
η_{NO3N}	0.062	Kg (NO_3) mol^{-1} (N)	Peso de nitrato por mol de nitrógeno

5.6 Calibración del Modelo

Para el caso particular de este estudio, la calibración se llevó a cabo modificando sólo tres parámetros como lo recomienda López-Cruz *et al.* (2004). Los parámetros modificados son: el coeficiente de respiración de mantenimiento (k) ya que afecta directamente el contenido de carbono en vacuolas y en la estructura, el coeficiente de extinción de la radiación a través del dosel (α) que afecta directamente la tasa de fotosíntesis y tasa de crecimiento, influyendo en

la cantidad de biomasa total, y el coeficiente tasa de crecimiento sin inhibición (ν) que al igual que los anteriores afecta a las dos variables de estado y por tanto a la biomasa total (López-Cruz *et al.* 2004).

5.7 Validación del Modelo

Para realizar el proceso de validación del modelo se tomaron los valores obtenidos de la simulación en la que se usaron como datos de entrada las variables climáticas (PAR, CO₂, Temperatura) medidas dentro del invernadero a lo largo del experimento. Así mismo se utilizaron los datos obtenidos de los muestreos de cinco plantas realizados en el cultivo de lechuga. A fin de obtener la validación se realizó una comparación de los pares de datos (simulados vs. reales) mediante el índice de correlación ajustado R^2 , la comparación de estos datos se efectuó en el programa Microsoft Excel 2010 (beta) de Microsoft Office 2010 (Microsoft ©).

VI. RESULTADOS

6.1 Calibración del Modelo

El ajuste de parámetros es una de las más importantes actividades cuando se prueban modelos matemáticos. En nuestro caso un gran número de parámetros fueron encontrados para integrar el modelo, sin embargo la mayoría de estos están relacionados al cultivo específico que fue probado (Seginer, 2003; López-Cruz, 2003; loslovich *et al.*, 2009).

Tabla II. Ajuste de parámetros.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>	<i>Significado</i>
<i>a</i>	0.2	m ² (suelo) mol ⁻¹ (C)	Extinción de radiación a través del dosel
<i>k</i>	0.4e-6	s ⁻¹	Coefficiente de respiración de mantenimiento
<i>v</i>	22.1	mol (C) m ⁻² (suelo)	Coefficiente de la tasa de crecimiento sin inhibición

Lopez-Cruz *et al.* (2004), encontraron que un pequeño subconjunto de estos parámetros tienen el mayor efecto sobre los estados y las variables de salida a través del tiempo los cuales fueron coeficiente de respiración de mantenimiento (*k*), coeficiente de extinción de radiación a través del dosel (*a*) y el coeficiente de la tasa de crecimiento (*v*). Por lo tanto, con el fin de ajustar el modelo se probaron varias series de valores para cada uno de estos parámetros (*a*, *v*, *k*) hasta encontrar los valores apropiados (Tabla II).

6.2 Curva de Crecimiento de Lechuga

El cultivo de lechuga no fue desarrollado completamente, ya que la planta se consume en etapas tempranas sin necesidad de llegar a floración. Los pesos fresco y seco de la planta se usaron para medir el crecimiento del cultivo de lechuga. Estos datos fueron correlacionados a las salidas del modelo para llevar a cabo el proceso de validación.

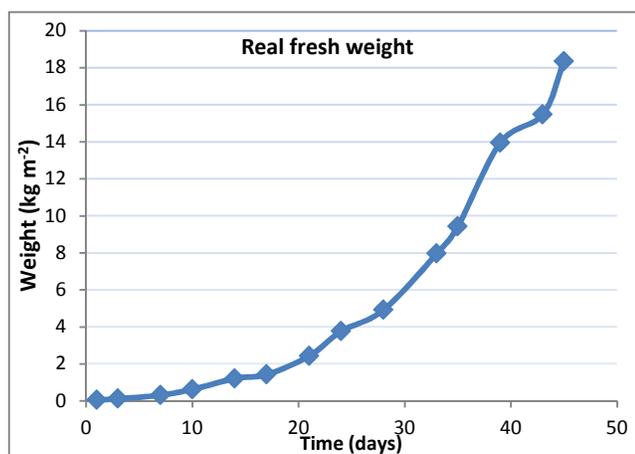


Fig. 1. Curva de crecimiento del cultivo de lechuga (Peso fresco Kg m⁻²).

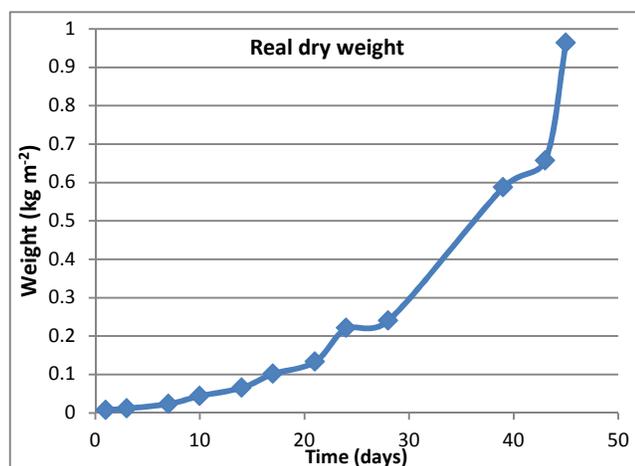


Fig. 2. Curva de crecimiento del cultivo de lechuga (Peso seco Kg m⁻²).

Los datos obtenidos del experimento muestran la curva de crecimiento de lechuga bajo condiciones climáticas de invernadero del sureste de Coahuila. La figura 1 muestra el incremento en peso fresco. Los resultados se muestran en kg m^{-2} de materia fresca o seca (Figuras 1 y 2).

6.3 Validación del Modelo

El modelo fue validado usando los parámetros antes mencionados (Tabla I)(López-Cruz, 2003; loslovich *et al.*, 2009) en conjunto con aquellos resultantes de la calibración del modelo (k , a , v)(Tabla II). En las figuras 3 y 4, se muestra la correlación de los datos simulados y los datos reales. En cuanto al peso de materia fresca se encontró un coeficiente de correlación ajustado $R^2=0.9975$ (Figura 3). En lo que se refiere a peso de materia seca se encontró un coeficiente de correlación ajustado $R^2=0.974$ (Figura 4).

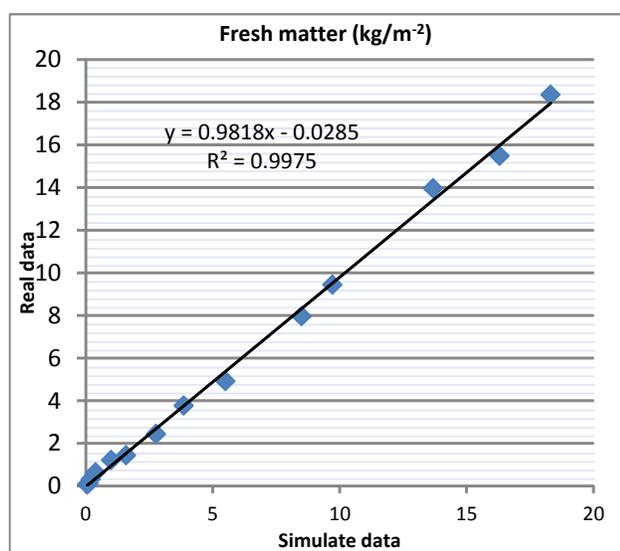


Fig. 3. Correlación entre datos reales del crecimiento de lechuga (Materia fresca Kg m^{-2}) y los simulados por el modelo, $R^2=0.9975$. La línea representa la línea de identidad (1:1).

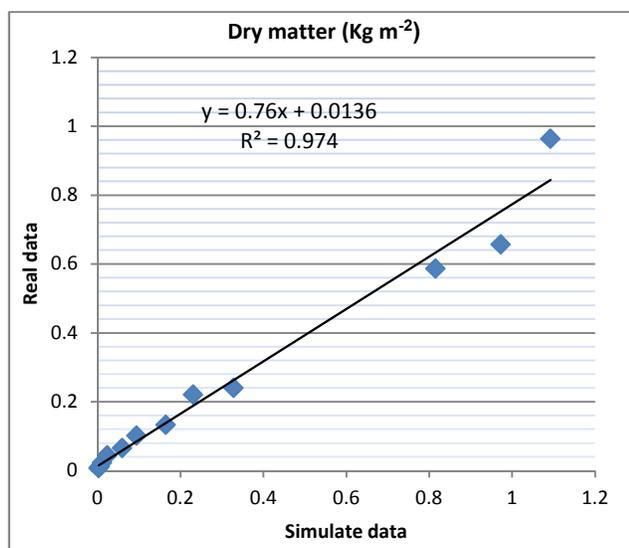


Fig. 4. Correlación entre datos reales del crecimiento de lechuga (Materia seca Kg m⁻²) y los simulados por el modelo, $R^2=0.974$. La línea representa la línea de identidad (1:1).

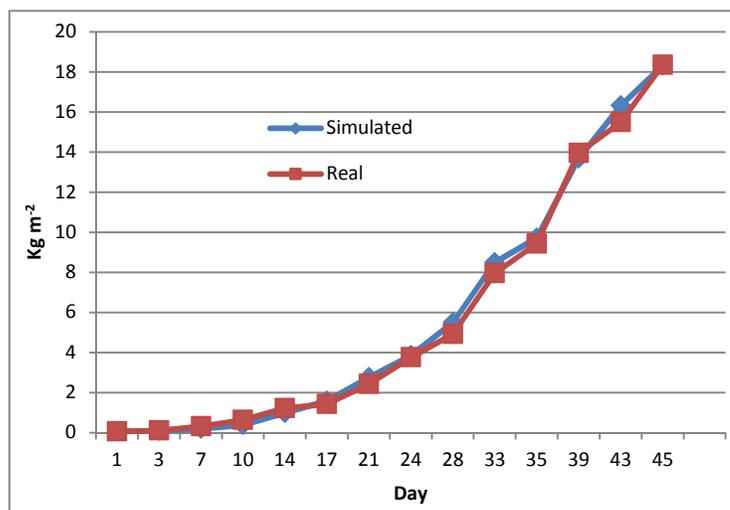


Fig. 5. Comparación de datos de materia fresca. Real vs Simulado.

VII. DISCUSIÓN

Este estudio presentó una validación del modelo NICOLET B3 en el sureste de Coahuila para el cultivo de lechuga desarrollado bajo las condiciones de invernadero y clima de la región.

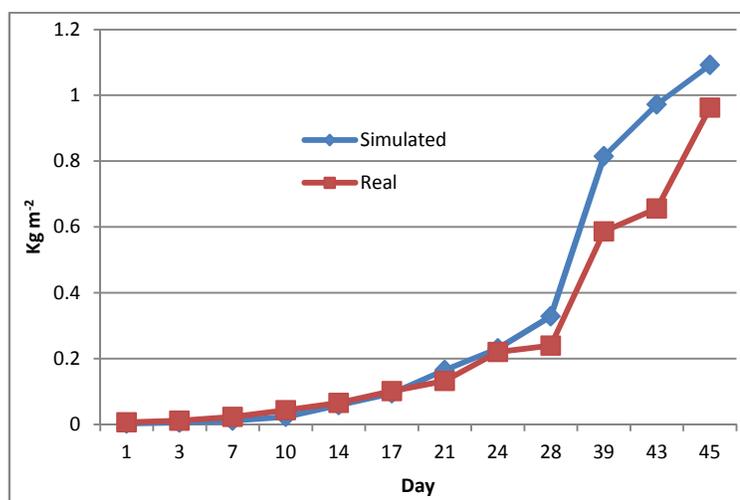


Fig. 6. Comparación de datos de materia seca. Real vs Simulado.

El modelo NICOLET B3 ha mostrado imitar de buena forma los cambios en el ambiente del invernadero así como los cambios ontogenéticos durante el periodo de desarrollo (Figuras 5 y 6). Un punto importante es que el modelo se validó usando datos de un invernadero sin control de clima. Se observó una correlación casi perfecta en el peso de materia fresca ya que fue un $R^2=0.9975$ y para el caso del peso de materia seca también fue bueno ya que se obtuvo un $R^2=0.974$. Esto es importante, ya que generalmente en los trabajos de

investigación se da un control de la temperatura al momento de desarrollar el cultivo.

Se observaron algunas variaciones al final del desarrollo del cultivo en lo que se refiere a la correlación entre los datos simulados y los reales, aunque se puede decir que es de poca importancia, ya que el promedio de error es menor que el 3%. La razón de estas variaciones se puede atribuir a un error o fallas al momento de trabajar las muestras.

Otro punto importante es que si se desea trabajar con diferentes tratamientos, se recomienda hacer un reajuste de un pequeño grupo de parámetros que generalmente va de 2 a 3 (Seginer *et al.*, 2004). Considerando lo anterior, para el presente trabajo se realizó un ajuste de tres parámetros (a , k , v) que son los propuestos por López-Cruz *et al.* (2004).

Se debe prestar atención al equipo usado para el desarrollo experimental. Los sensores deben ser capaces de soportar las condiciones presentes dentro del invernadero y permanecer funcionales a través del tiempo. Los datos deben ser tomados de forma periódica ya que son información vital para el proceso de validación. Se requiere de un software para la programación y simulación del modelo, además de que para estos trabajos se necesitan condiciones de invernadero para llevar a cabo el experimento.

VIII. CONCLUSIONES

El modelo NICOLET B3 ha sido validado en las condiciones específicas del sureste de Coahuila, México. El resultado del presente trabajo mostró que el modelo puede simular con gran precisión el comportamiento de crecimiento del cultivo, que para este caso fue lechuga.

Los modelos matemáticos son herramientas importantes para reproducir o incluso predecir el comportamiento de cultivos a través del tiempo. Estos pueden usarse para la optimización de las condiciones climáticas necesarias para mejorar la cosecha del cultivo, particularmente bajo condiciones de invernadero. Además, estos modelos pueden ser usados para predicción de cosecha, selección de fechas de siembra, toma de decisiones para optimizar la nutrición etc. Esta información puede utilizarse para propósitos de predicción y toma de decisiones en la agricultura de invernaderos.

IX. LITERATURA CITADA

- Abreu, P., J. F. Meneses. 2000. TOMPOUSSE, a model of yield prediction for tomato crops: calibration study for unheated plastic greenhouses. *Acta Hort. (ISHS)* 519: 141-149
- Bergez, J. E., O. Crespo, F. García, C. Gary, M.H. Jeuffroy, E. Justes, C. Loyce, W. Sadok. 2007. Designing crop management systems by simulation. *Farming Systems Desing* 4-5
- Broadley, M. R., I. Seginer, A. Burns, A. J. Escobar-Gutiérrez, I. G. Burns, P. J. White. 2003. The nitrogen and nitrate economy of butterhead lettuce (*Lactuca sativa* var. capitata L.). *Journal of Experimental Botany* 54(390):2081-2090
- Castañeda-Miranda, R., E. Ventura-Ramos, R. Peniche-Vera, G. Herrera-Ruiz. 2007. Análisis y simulación del modelo físico de un invernadero bajo condiciones climáticas de la región central de México. *Agrociencia* 41: 317-335
- Chamont, S. 1993. Modelling dry matter allocation in cucumber crops competition between fruits and roots. *Acta Hort. (ISHS)* 328: 195-203
- Cheeroo-Nayamuth, B.F. 1999. Crop modeling/simulation: an overview. *Proceedings of AMAS* 11-26.

- Cordova, J. J., W. Yu. 2009. Stable Fourier neural networks with application to modeling lettuce growth. Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks 591-596.
- Dai, J., W. Luo, Y. Li, C. Yuan, Y. Chen, J. Ni. 2006. A simple model for prediction of biomass production and yield of three greenhouse crops. Acta Hort. (ISHS) 718: 81-88
- Dimokas, G., C. Kittas, M. Tchamitchian. 2008. Validation of a tomato crop simulator for mediterranean greenhouses. Acta Hort. (ISHS) 797: 247-252
- Gallardo, M., R. L. Snyder, K. Schulbach, L. E. Jackson. 1996. Crop growth and water use model for lettuce. Journal of Irrigation and Drainage Engineering November-December: 354-359
- Gary, C. 1999. Modeling greenhouse crops: state of the art and perspectives. Acta Hort. (ISHS) 495: 317-322
- Gary, C., J. W. Jones, M. Tchamitchian. 1998. Crop modeling in horticulture: state of the art. Scientia Horticulturae 74: 3-20
- Gijzen, H., E. Heuvelink, H. Challa, L. F. M. Marcelis, E. Dayan, S. Cohen, M. Fuchs. 1998. HORTISIM: A model for greenhouse crops and greenhouse climate. Acta Hort. (ISHS) 456: 441-450
- Goudriaan, J., H. H. Van Laar. 1994. Modelling potential crop growth processes (textbook with exercises). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 238 p. En: López-Cruz, I. L., A. Ramírez-Arias, A. Rojano-Aguilar. 2004. Análisis de sensibilidad de un modelo dinámico de

- crecimiento para lechugas (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en invernadero. *Agrociencia* 38: 613-624
- Heuvelink, E. 1999. Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development. *Annals of Botany* 83: 413-422
- Heuvelink, E., L. F. M. Marcelis. 1989. Dry matter distribution in tomato and cucumber. *Acta Hort. (ISHS)* 260: 149-180
- Higashide, T., M. Takaichi, H. Shimaji. 2000. Modeling of cucumber growth using the L-system. *Acta Hort. (ISHS)* 519: 43-51
- Hussain, S. I., P. Hadley, S. Pearson. 2008. A validated mechanistic model of carrot (*Daucus carota* L.) growth. *Scientia Horticulturae* 117: 26-31
- Hyun, J. L., J. Goudriaan, H. Challa. 2003. Using the exponential growth equation for modelling crop growth in year-round cut chrysanthemum. *Annals of botany* 92: 697-708
- Ioslovich, I., M. I. Ramírez-Sosa M., Per-Olof G. 2009. Identification of a nonlinear dynamic biological model using the dominant parameter selection method. *Journal of the Franklin Institute*
[doi:10.1016/j.jfranklin.2009.11.007](https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2009.11.007)
- Jones, J. W. 1998. Model integration and simulation tools. *Acta Hort. (ISHS)* 456: 411-418
- Kano, A., C. H. M. Van Bavel. 1988. Design and test of a simulation model of tomato growth and yield in a greenhouse. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 56(4): 408-416
- Kahlen, K. 2006. 3D architectural modelling of greenhouse cucumber (*Cucumis melo* L.) using L-systems. *Acta Hort. (ISHS)* 718: 51-58

- Ko, J., G. Piccinni, W. Guo, E. Steglich. 2009. Parameterization of EPIC crop model for simulation of cotton growth in south Texas. *Journal of Agricultural Science* 147: 169-178
- Liebig, H. P. 1989. Model of cucumber growth and prediction of yields. *Acta Hort. (ISHS)* 248: 187-191
- Lin, W. C. 2002. Crop modeling and yield prediction for greenhouse-grown lettuce. *Acta Hort. (ISHS)* 593: 159-164
- Lin, W. C. 2004. Modelling the colouration of greenhouse peppers. *Acta Hort. (ISHS)* 654: 31-36
- Linker, R., I. Seginer, F. Buwalda. 2004. Description and calibration of a dynamic model for lettuce grown in a nitrate-limiting environment. *Mathematical and Computer Modelling* 40: 1009-1024
- Lopes, S.J., D. D. Neto, P. A. Manfron, L. R. Jasiewicz. 2004. Models to estimate phytomass accumulation of hydroponic lettuce. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 61(4): 392-400
- López-Cruz, I. L. 2003. Modelación matemática de hortalizas en invernadero. *Curso Internacional de Invernaderos. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo México.*
- López-Cruz, I. L. 2004. Introducción a la simulación de crecimiento y desarrollo de cultivos usando Fortran Simulation Translator (FST). *Primer Congreso Nacional de Fenología Agrícola y Modelos de Simulación Aplicados a la Agricultura. Chapingo, México*

- López-Cruz, I. L., A. Ramírez-Arias, A. Rojano-Aguilar. 2004. Análisis de sensibilidad de un modelo dinámico de crecimiento para lechugas (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en invernadero. *Agrociencia* 38: 613-624
- López-Cruz, I. L., A. Ramírez-Arias, A. Rojano-Aguilar. 2005. Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 11(2): 257-267
- López-Cruz, I. L., L. G. Van Willigenburg, G. Van Straten. 2003. Optimal control of nitrate in lettuce by a hybrid approach: differential evolution and adjustable control weight gradient algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture* 40: 179-197
- Marcelis, L. F. M. 1994. A simulation model for dry matter partitioning in cucumber. *Annals of Botany* 74: 43-52
- Marcelis, L. F. M., E. Brajeul, A. Elings, A. Garate, E. Heuvelink. 2005. Modelling nutrient uptake of sweet pepper. *Acta Hort. (ISHS)* 691: 285-292
- Marcelis, L.F.M., A. Elings, M. J. Bakker, E. Brajeul, J. A. Dieleman, P. H. B. de Visser, E. Heuvelink. 2006. Modelling dry matter production and partitioning in sweet pepper. *Acta Hort. (ISHS)* 718: 121-128
- Marcelis, L. F. M., H. Gijzen. 1998. A model for prediction of yield and quality of cucumber fruits. *Acta Hort. (ISHS)* 476: 237-242
- Matheu, J., R. Linker, L. Levine, L. Albright, A. J. Both, R. Spanswick, R. Wheeler, E. Wheeler, D. deVilliers, R. Langhans. 2006. Evaluation of

the Nicolet model for simulation of short term hydroponic lettuce growth and nitrate uptake. *Biosystems Engineering* 95(3): 323-337

- McKenna, P. 2000. Summary of minor additions to original NICOLET model B3. Agricultural Engineering Department, Technion-Israel Institute of Technology. 11 p. En: López-Cruz, I. L., A. Ramírez-Arias, A. Rojano-Aguilar. 2004. Análisis de sensibilidad de un modelo dinámico de crecimiento para lechugas (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en invernadero. *Agrociencia* 38: 613-624
- Metselaar, K. 1999. Auditing predictive models: a case study in crop growth. Wageningen :proefschrift. En: López-Cruz, I. L. 2004. Introducción a la simulación de crecimiento y desarrollo de cultivos usando Fortran Simulation Translator (FST). Primer Congreso Nacional de Fenología Agrícola y Modelos de Simulación Aplicados a la Agricultura. Chapingo, México
- Nederhoff, E. M., H. Gijzen, J. Vegter. 1989. A dynamic simulation model for greenhouse cucumber (*Cucumis sativus* L.): validation of the submodel for crop photosynthesis. *Acta Hort. (ISHS)* 248: 255-263
- Nederhoff, E. M., J. G. Vegter. 1994. Canopy photosynthesis of tomato, cucumber and sweet pepper in greenhouses: measurements compared to models. *Annals of Botany* 73: 421-427
- Ngouajio, M., W. Kirk, R. Goldy. 2003. A simple model for rapid and nondestructive estimation of bell pepper fruit volume. *HortScience* 38(4): 509-511

- Pearson, S., T. R. Wheeler, P. Hadley, A. E. Wheldon, 1997. A validated model to predict the effects of environment on the growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.): implications for climatic change. *Journal of Horticultural Science* 72(4): 503-517
- Seginer, I. 2003. A dynamic model for nitrogen-stressed lettuce. *Annals of Botany* 91: 623-635
- Seginer, I., G. Van Straten, F. Buwalda. 1998. Nitrate concentration in greenhouse lettuce: a modeling study. *Acta Hort. (ISHS)* 456: 189-198
- Seginer, I., G. Van Straten, F. Buwalda. 1999. Lettuce growth limited by nitrate supply. *Acta Hort. (ISHS)* 507: 141-148
- Seginer, I., R. Linker, F. Buwalda, G. Van Straten, P. Bleyaert. 2004. The NICOLET lettuce model: a theme with variations. *Acta Hort. (ISHS)* 654: 71-78
- Seginer, I., P. Bleyaert, M. Breugelmans. 2004a. Modelling ontogenetic changes of nitrogen and water content in lettuce. *Annals of botany* 94: 393-404
- Thornley, J. H. M., I. R. Johnson. 2000. *Plant and crop modeling, a mathematical approach to plant and crop physiology*. The Blackburn Press. En: López-Cruz, Irineo L. 2003. *Modelación matemática de hortalizas en invernadero*. Curso internacional de invernaderos. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo México.
- Van Henten, E. J. 1994. Validation of a dynamic lettuce growth model for greenhouse climate control. *Agricultural Systems* 45: 55-72
- Van Henten, E. J., G. Van Straten. 1994. Sensitivity analysis of a dynamic growth model of lettuce. *J. agric. Engng. Res.* 59: 19-31

- Van Ittersum, M. K., P. A. Leffelaar, H. Van Keulen, M. J. Kropff, L. Bastiaans, J. Goudriaan. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy* 18:201-234. En: López-Cruz, I. L., A. Ramírez-Arias, A. Rojano-Aguilar. 2005. Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 11(2): 257-267
- Van Straten, G., I. Seginer, F. Buwalda. 1999. Calibration and sensitivity analysis of a dynamic model for control of nitrate in lettuce. *Acta Hort. (ISHS)* 507: 149-156
- Verlinden, B. E., B. M. Nicolaï, C. Sauviller, W. Baets. 2005. Bell pepper production prediction based on colour development distribution, solar radiation and glass house temperature data. *Acta Hort. (ISHS)* 674: 375-380
- Willcutts, J. F., A. R. Overman, G. J. Hochmuth, D. J. Cantliffe, P. Soundy. 1998. A comparison of three mathematical models of response to applied nitrogen: a case study using lettuce. *HortScience* 33(5): 833-836
- Yarkoni, N., P. McKenna. 2000. NICOLET simulation model B3. Agricultural Engineering Department, Technion-Israel Institute of Technology. En: López-Cruz, I. L., L. G. Van Willigenburg, G. Van Straten. 2003. Optimal control of nitrate in lettuce by a hybrid approach: differential evolution and adjustable control weight gradient algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture* 40: 179-197

- Zekki, H., C. Gary, A. Gosselin, L. Gauthier. 1999. Validation of a photosynthesis model through the use of the CO₂ balance of a greenhouse tomato canopy. *Annals of Botany* 84: 591-598
- Zhang, K., I. G. Burns, M. R. Broadley, M. Turner. 2004. Developing a dynamic model for glasshouse lettuce growth and nitrate accumulation. *Acta Hort. (ISHS)* 654: 63-70
- Zhang, K., I. G. Burns, M. K. Turner. 2008. Derivation of a dynamic model of the kinetics of the nitrogen uptake throughout the growth of lettuce: calibration and validation. *Journal of Plant Nutrition* 31(8): 1440-1460

X. ANEXO:**An Experimental Validation of NICOLET B3 Mathematical Model for Lettuce
Growth in the Southeast Region of Coahuila México by Dynamic
Simulation**

An Experimental Validation of NICOLET B3 Mathematical Model for Lettuce Growth in the Southeast Region of Coahuila México by Dynamic Simulation

A. Juárez-Maldonado¹, K. De-Alba-Romenus¹, M. I. Ramírez-Sosa M.², A.

Benavides-Mendoza¹, V. Robledo-Torres¹

¹Departamento de Horticultura, UAAAN, Saltillo, Coahuila, México

²Coordinación de Investigación División Profesional, ITESM Campus Saltillo, Coahuila, México

Phone: (52-844) 411-0200

Email: juma841025@hotmail.com

Abstract — An experiment was developed to validate the NICOLET B3 model. This model has two state variables: carbon content in the vacuoles and carbon content in the cell structure. Carbon dioxide, temperature and radiation taken inside a greenhouse were used as inputs to the model; the model gave out fresh and dry matter of lettuce aerial part. The model dynamic simulation was carried out using MatLab Simulink R2009a. A lettuce crop growth was developed under greenhouse conditions in soilless system, with a set of data loggers to record data. Results have shown that the data obtained from experiment are accurately predicted with this model.

Keywords — Lettuce, dynamic simulation, crop, greenhouse.

I. INTRODUCTION

A model is a set of mathematical equations describing a physical system [1]. The crop model is a logical or quantificational expression of interactions between crop growth system and environmental factors [2].

A crop growth simulation is a computational recreation of the crop growing process [3]. The model simulates or imitates the behavior of a real crop by predicting the growth of its components, such as leaves, roots, stems and grains. Thus, a crop growth simulation model not only predicts the final state of total biomass or harvestable yield, but also contains quantitative information about major processes involved in the growth and development of a plant [1]. Simulation models have rapidly developed in the last years [3, 4, 5].

With development of the agricultural information technology, crop model study has come to a new

stage. Researchers have proposed many kinds of crop growth simulating systems thus accelerating the development of automation and management of production systems [2].

A simple two state variables model was developed and tested in greenhouses of Northern Germany [6] to describe the nitrate concentration in lettuce when nitrate supply is unlimited. Later, the same model was modified to predict growth under limited nitrate conditions. The modified model includes a nitrate balance equation [7].

The NICOLET model has been able to reproduce seasonal variations of nitrate content, as well as the effects of drastic N-stress treatments. These results are illustrated by comparing measured data with model-simulations. Accurate prediction of nitrate concentration is difficult, due to its sensitivity to changes in the environment. Exact control of nitrate under commercial conditions may require transient corrective measures, such as N-interruption, in conjunction with a good plant-nitrate monitoring system [8].

Seginer modified the NICOLET model by adding a storage compartment for “excess” carbon, resulting in a model with three compartments [5]. The dynamic behavior of this model was examined, described and calibrated with data collected under severe N-stress conditions [9].

A sensitivity analysis of NICOLET B3 model was developed in Chapingo, Mexico. The sensitivity analysis showed that three parameters have a major effect on the model performance [4].

Also, a dynamic mechanistic model was developed to predict lettuce dry matter accumulation and nitrate concentration during growth. The model assumes that lettuce has three separate pools. At the same time, the model also simulates time-dependent water mass stored in lettuce [10].

The NICOLET model was studied for different climate zones of Europe within the scope of the EC NICOLET project [11]. The objective of the present work is to validate the NICOLET B3 model under the climate conditions of the southeast of Coahuila, Mexico.

II. METHODOLOGY

Description of the model

The NICOLET (Nitrate Control in Lettuce) model, proposed for lettuce crops [6], has two state variables: carbon content in the vacuoles and carbon content in the cell structure; the core of this model is a balance in carbon flows [4]. The outputs of the model, plant dry weight and fresh weight, are calculated from the states by means of algebraic equations [6]. The NICOLET B3 model is a modified version of original NICOLET [12].

The NICOLET B3 model [13] is defined by the following two ordinary differential equations:

$$\frac{dM_{Cv}}{dt} = F_{Cav} - h_g F_{Cm} - F_{Cg} - F_{Cvs} \quad (1)$$

$$\frac{dM_{Cs}}{dt} = F_{Cvs} - (1 - h_g) F_{Cm} \quad (2)$$

These equations represent carbon balances both in the vacuoles and in the cell structure. The terms M_{Cv} and M_{Cs} represent the carbon content in the vacuole and the carbon content in the cell structure. The terms F_{Cav} , F_{Cm} , F_{Cg} and F_{Cvs} , denote the rates of photosynthesis, maintenance respiration, growth respiration and growth, respectively, h_g is a growth inhibition function. These terms are functions of the following states: M_{Cv} [mol(C) m⁻² (ground)], M_{Cs} [mol(C) m⁻² (ground)]. They are functions of the following variables: light, I (W m²), carbon dioxide, C (ppm) and temperature, T (°C). It is assumed that photosynthesis depends on light and carbon dioxide concentration but not on temperature, whereas growth and respiration hinges on temperature only. Appendix A shows all the functions of the model and they are thoroughly described in [4,14]. Table I shows all the values of the parameters of NICOLET B3 model [5, 11, 14].

TABLE I.
NICOLET B3 PARAMETERS VALUES USED DURING SIMULATION

Parameter	Value	Units
a	1.7	m ² (ground) mol ⁻¹ (C)
b_g	0.2	Dimensionless
b_p	0.8	Dimensionless
c	0.0693	°C ⁻¹
C_c	0.0011	mol (C) m ⁻³
k	0.26e-6	s ⁻¹
T^*	20	°C
β	6	m ³ Pa mol ⁻¹ (N)
γ	0.61	m ³ Pa mol ⁻¹ (C)
ε	0.04-0.07	mol (C) mol ⁻¹ (PAP)
θ	0.3	Dimensionless
λ	1/1200	m ³ mol ⁻¹ (C)
ν	13	mol (C) m ⁻² (suelo)
σ	1.4e-3	m s ⁻¹
s_p	10	Dimensionless
s_g	10	Dimensionless
$Pldens$	19.6	Plants per meter square
II_v	580	Pa
η_{OMC}	0.03	Kg (DM) mol ⁻¹ (C)
η_{MMN}	0.148	Kg (DM) mol ⁻¹ (N)
η_{NO3N}	0.062	Kg (NO ₃) mol ⁻¹ (N)

Experimental lettuce crop growth

An experiment about lettuce growth was carried out at the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México, coordinates 25° 22' N, 101° 00' W, altitude 1760 m, in a greenhouse of 200 m², with a curved roof and polyethylene cover. A crop of lettuce (*Lactuca sativa* L.), "Great Lakes" variety, was cultivated from March 24th 2010 to May 7th 2010. Plants were transplanted to a perlite and peat moss (2:1 ratio) soilless system within 4 L. bags. A density design of 19.6 plants per square meter was used. The model inputs were air temperature, radiation and carbon dioxide inside the greenhouse which were recorded every 15 minutes using different data loggers Fig. 3 shows the inputs as they were recorded during the elapsed time of 45 days of the experiment. A K33 ELG data logger (CO2 Meter) was used to measure carbon dioxide; a sensor Quantum LI-190 (LI-COR inc.) to measure PAR radiation and a sensor 1400-101 (LI-COR inc.) to measure temperature. The latter two sensors were connected to a unique data logger LI-1400 (LI-COR inc.). The sensors were placed in the center of the greenhouse at crop height. There was not control of greenhouse climate. The nutrient solution was a commercial solution (FertiDrip) with a pH of approximately 6.5 and electric conductivity of 1.4 mS. In order to get the necessary information to validate the model, 5 randomly selected plants were taken twice a week and the fresh weight of their aerial part was recorded. The dry weight was determined after drying the samples at 80 °C for 48 hours.

Model simulation

The model simulation was carried out using MatLab Simulink R2009a (MathWoks, inc.). A variable step-size solver was used (ode45). The initial values for M_{cv} and M_{cs} were 0.007 and 0.0671 respectively. The equations system were programmed in Simulink using radiation (I), temperature (T) and carbon dioxide concentration (C) as model inputs. This data was taken from experimental lettuce crop growth. The model outputs were fresh and dry matter variables.

In order to obtain the R^2 coefficient and the linear regression equation, Microsoft Excel 2010 (Beta) was used.

III. RESULTS

Fitting the model

Parameter tuning is one of the most important activities when testing a mathematical model. In our case a large number of parameters were found to integrate the model, nevertheless most of them are related to the specific crop being tested [5,11,14].

I.Lopez et al in [4] have shown that a small subset of these parameters has a major effect on both state and output variables through time, namely maintenance respiration coefficient (k), coefficient of radiation extinction through the canopy (a) and growth rate coefficient (v). Therefore, in order to adjust the model, several series of values were tested for each one of these parameters (a , v , k) until appropriate values were found (Table II).

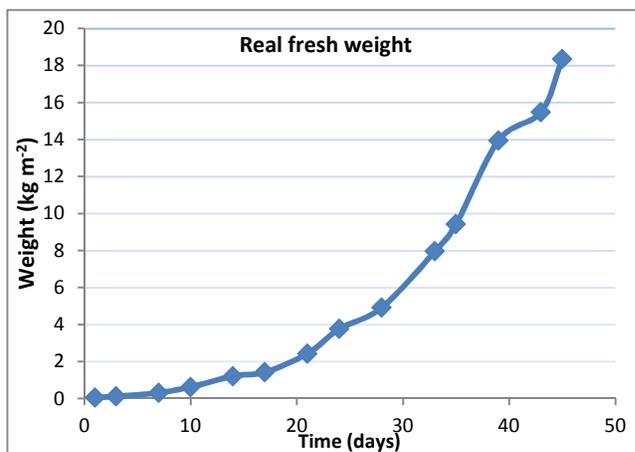


Fig. 1. Growth curve of fresh weight of lettuce crop (kg m^{-2}).

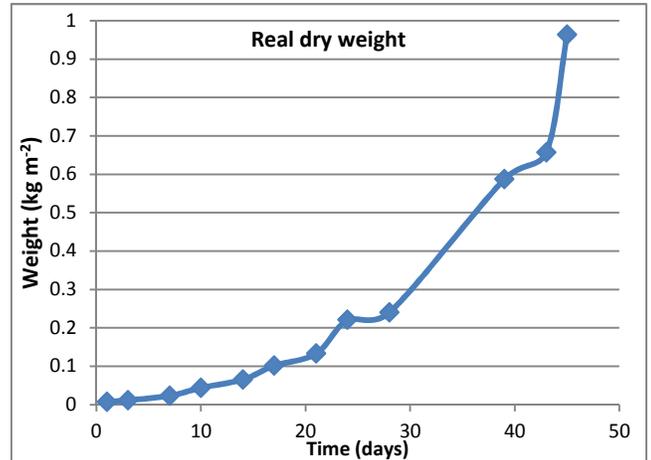


Fig. 2. Growth curve of dry weight of lettuce crop (kg m^{-2}).

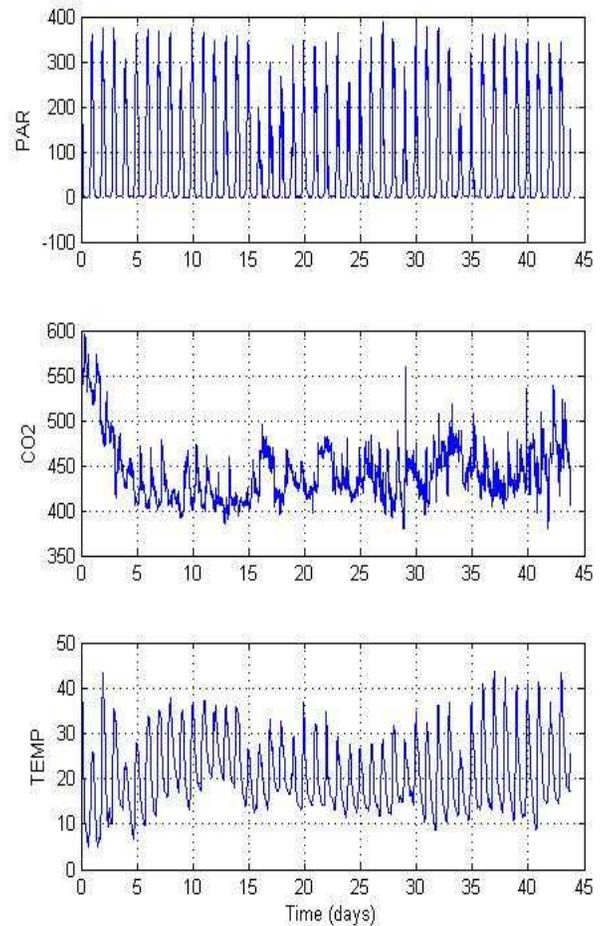


Fig. 3. Input variables CO_2 (ppm), PAR (W m^{-2}) and Temperature ($^{\circ}\text{C}$) measured within the greenhouse.

TABLE II.
PARAMETERS SETTING.

Parameter	Value	Units
a	0.2	m^2 (ground) $mol^{-1}(C)$
k	$0.4e-6$	s^{-1}
ν	22.1	mol (C) m^2 (ground)

Curve of lettuce growth

Lettuce crop does not develop to a complete plant before harvest mainly because it is consumed in its early stages. So, in order to measure lettuce crop growth, fresh and dry weights are used. These data were correlated to the model outputs in the validation process.

The data obtained from the experiment shows the lettuce growth curve under climatic greenhouse conditions of southeast Coahuila. Figure 1 shows the increment in fresh weight. The results are shown in $kg\ m^{-2}$ of aerial dry or fresh matter only (Figures 1, 2).

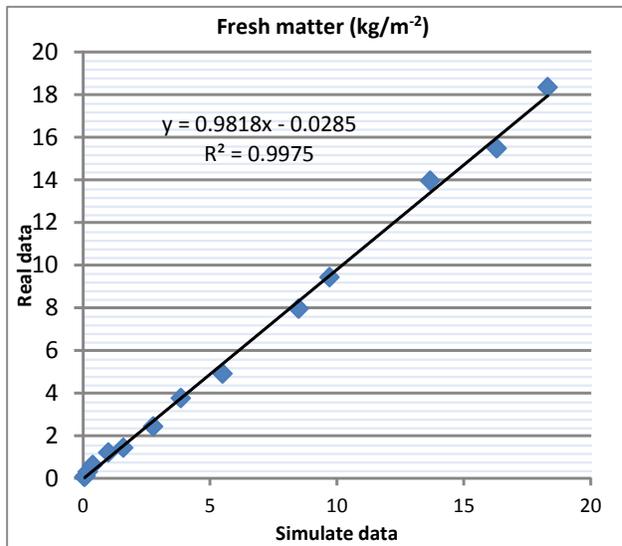


Fig. 4. The relationship between real data of the lettuce growth (Fresh matter $kg\ m^{-2}$) and those predicted by the model, where $R^2=0.9975$. The line represents the line of identity (1:1).

Model validation

The model was validated using the parameter values already mentioned [11, 14] (Table I) and those derived from the fitting of the model (k, a, ν). The values predicted by the model fitted the collected data (Figures 4, 5). Regarding fresh matter weight, the correlation coefficient $R^2=0.9975$ shows almost perfect relationship (Figure 4). Regarding dry matter weight

the coefficient $R^2=0.974$ shows in this case a little lower relationship, nevertheless it can be considered good (Figure 5). There was slight evidence for an over prediction of plant dry weight and fresh weight matter of the aerial part at higher values. Most of the error bars for individual points intersected the line of identity, suggesting a good fit for lettuce growth prediction.

IV. DISCUSSION

This study has presented a validation of NICOLET B3 model in southeast of Coahuila for lettuce crop under greenhouse conditions and climate conditions of the region.

The NICOLET B3 model has been shown to imitate 'normal' responses to seasonal changes in the greenhouse environment, and the ontogenetic changes during the growing period (Figures 6, 7). The model was validated using data from one greenhouse without climate control. Nevertheless, the relationship was almost exact, with an $R^2=0.9975$ for fresh matter weight and an $R^2=0.974$ for dry matter weight. This is important because, generally speaking, there is temperature control in crop growth, even in research works [4].

Some variations were observed at the end of lettuce growth concerning the relationship between simulated data and real data, but this can be neglected because the average error is smaller than 3%. The reason of these discrepancies may be partly attributed to an error in the measured data.

It should be pointed out, however, that while very different treatments within a given data set can be simulated with a single set of parameters, each new set (new source) of data requires a re-adjustment of some (2 or 3) of the parameters [8]. Considering such a statement, we adjusted three parameters (a, k, ν), as proposed by López-Cruz *et al.* [4]. This lack of robustness among data sets is partly the result of model shortcomings and partly due to differences in measurement techniques [8]. However, it can be seen that the simulation provided for the model is very exact, so it can be used under specific conditions for better results.

Particular attention should be paid to the equipment used to perform the experimental research. Sensors must stay outdoors and should be prepared to be functional throughout time. Data should be taken on

a periodic basis as this information is essential for the validation process. Dedicated software for model programming and simulation is needed. Greenhouse conditioning is necessary to carry out the experiment.

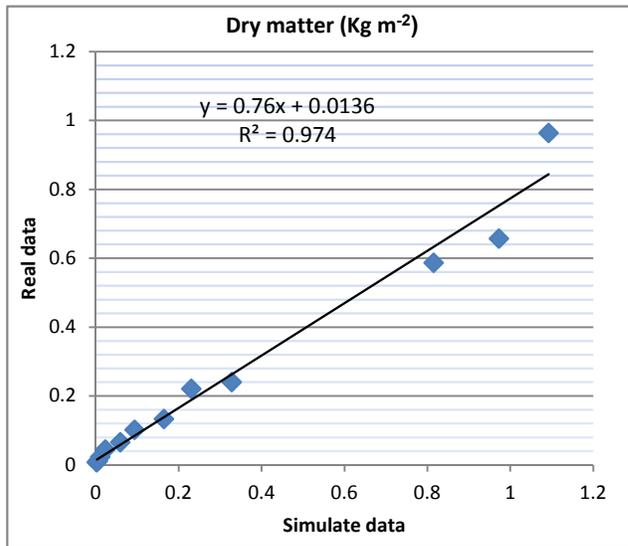


Fig. 5. The relationship between real data of the lettuce growth (Dry matter Kg m²) and those predicted by the model, where R²=0.974. The line represents the line of identity (1:1).

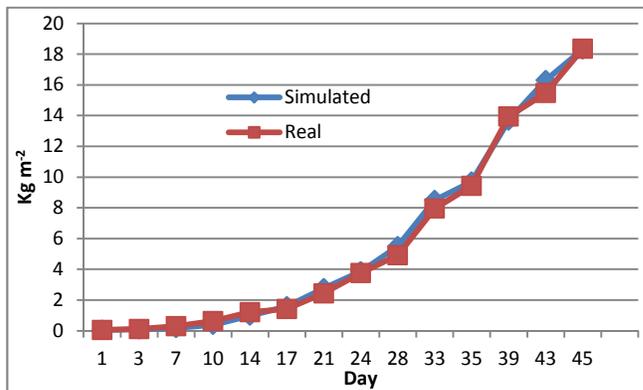


Fig. 6. Real vs Simulated fresh matter data comparison.

V. CONCLUSION

The NICOLET B3 model has been validated in the specified conditions of southeast of Coahuila, México. The result of the present work has shown that such a model can simulate with a great degree of accuracy the behavior of a growing crop, in our case, lettuce crop.

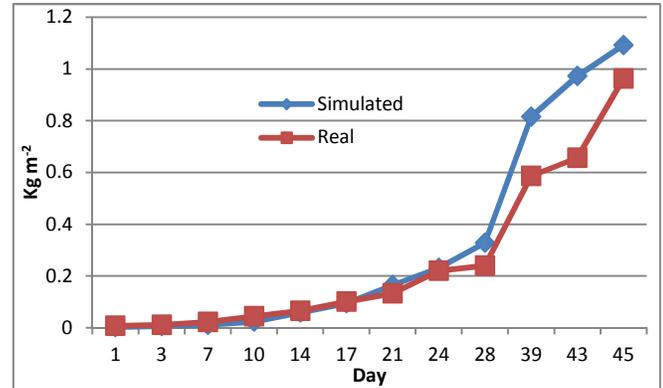


Fig. 7. Real vs Simulated dry matter data comparison.

Mathematical models are useful tools to reproduce or predict the behavior of crops throughout time. They can be used to optimize weather conditions needed to better crop yield, particularly under greenhouse conditions. Also, these models can be used to predict crop yield and to take decisions concerning mineral nutrient optimization, as well as seedtime and harvest date selection. So, this information can be used for prediction purposes and decision taking in greenhouse agriculture.

ACKNOWLEDGMENT

This work has been completely supported by Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Research Projects under project number 0203-0206-2180.

REFERENCES

- [1] Y. W. Jame, H. W. Cutforth, Crop growth models for decision support systems. *Can. J. Plant Sci.* 1996, 76: 9-19.
- [2] Jin-Xiang Chu, Zhong-Fu Sun, Ke-Ming Du, Qian Jia, Ying-Chun Wang, Shuang Liu, *A Universal Web-based Simulation System for Greenhouse Crops*. Second International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications Second International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, IEEE Press, 2007, pp. 185-187.
- [3] Z.F. Sun, R.J. Chen. Preliminary investigation on theoretical principles and technical methods of greenhouse crop model. *Scientia Agricultura Sinica*(in Chinese), 2002, 35(3): 320-324.

- [4] I. L. López-Cruz, A. Ramírez-Arias, A. Rojano-Aguilar, Sensitivity analysis of a dynamic growth model for greenhouse grown lettuce (*Lactuca satival* L.), *Agrociencia*, 2004, 38: 613-624.
- [5] I. Seginer, A dynamic model for nitrogen-stressed lettuce, *Annals of Botany*, 2003, 91: 623-635.
- [6] I. Seginer, F. Buwalda, G. van Straten, Nitrate concentration in greenhouse lettuce: a modeling study. *Acta Hort.* 1998, 456: 189-198.
- [7] I. Seginer, G. van Straten, F. Buwalda, Lettuce growth limited by nitrate supply, 1999, *Acta Hort*, 507: 141-148.
- [8] I. Seginer, R. Linker, F. Buwalda, G. van Straten, P. Bleyaert, The NICOLET lettuce model: a theme with variations, *Acta Hort.* 2004, 654: 71-78.
- [9] R. Linker, I. Seginer, F. Buwalda, Description and calibration of a dynamic model for lettuce grown in a nitrate-limiting environment, *Mathematical and Computer Modelling*, 2004, 40: 1009-1024.
- [10] K. Zhang, I. G. Burns, M. R. Broadley, M. Turner, Developing a dynamic model for glasshouse lettuce growth and nitrate accumulation, *Acta Hort.* 2004, 654: 63-70.
- [11] I. Ioslovich, M. I. Ramirez-Sosa M., Per-Olof G., Identification of a nonlinear dynamic biological model using the dominant parameter selection method, *Journal of the Franklin Institute* 2009, "In press" [doi:10.1016/j.jfranklin.2009.11.007](https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2009.11.007)
- [12] P. MacKeena, Summary of minor additions to original NICOLET model B3, 2000, Agricultural Engineering Department, Technion-Israel Institute of Technology, 11p.
- [13] N. Yarkoni, P. McKeena, NICOLET simulation model B3, 2000, Agricultural Engineering Department, Technion-Israel Institute of Technology.
- [14] I. L. López-Cruz, L. G. van Willigenburg, G. van Straten, Optimal control of nitrate in lettuce by a hybrid approach: differential evolution and adjustable control weight gradient algorithms, *Computers and Electronic in Agriculture*, 2003, 40: 179-197.

Appendix A: NICOLET B3 model equations

$$\frac{dM_{Cv}}{dt} = F_{Cav} - h_g F_{Cm} - F_{Cg} - F_{Cvs} \quad (1)$$

$$\frac{dM_{Cs}}{dt} = F_{Cvs} - (1 - h_g) F_{Cm} \quad (2)$$

$$F_{Cav} = p\{I, C_{Ca}\} f\{M_{Cs}\} h_p\{C_{Cv}\} \quad (3)$$

$$p\{I, C_{Ca}\} = \frac{\varepsilon I \sigma (C_{Ca} - C_C)}{\varepsilon I + \sigma (C_{Ca} - C_C)} \quad (4)$$

$$f\{M_{Cs}\} = 1 - \exp\{-aM_{Cs}\} \quad (5)$$

$$h_p\{C_{Cv}\} = \frac{1}{1 + \left(\frac{(1-b)\Pi_v}{\Pi_v - \gamma C_{Cv}} \right)^{Sp}} \quad (6)$$

$$\beta C_{Nv} + \gamma C_{Cv} = \Pi_v \quad (7)$$

$$F_{Cm} = M_{Cs} e\{T\} \quad (8)$$

$$e\{T\} = K \exp\{c(T - T^*)\} \quad (9)$$

$$F_{Cvs} = g\{T\} f\{M_{Cs}\} h_g\{C_{Cv}\} \quad (10)$$

$$g\{T\} = ve\{T\} \quad (11)$$

$$h_g\{C_{Cv}\} = \frac{1}{1 + \left(\frac{b_g \Pi_v}{\gamma C_{Cv}} \right)^{Sg}} \quad (12)$$

$$F_{Cg} = \theta F_{Cvs} \quad (13)$$

$$C_{Cv} = \frac{M_{Cv}}{\lambda M_{Cs}} \quad (14)$$

$$\Pi_v - \Pi_r = P_v \quad (15)$$

$$Y_{fm} = \frac{1000}{pldens} M_{fm} \quad (16)$$

$$M_{fm} = 1000 \lambda M_{Cs} + M_{DM} \quad (17)$$

$$C_{NO3} = 10^6 \eta_{NO3N} C_{NO3N} \quad (18)$$

$$C_{NO3N} = C_{Nv} \frac{1 - DFR}{1000} \quad (19)$$

$$DFR = \frac{M_{DM}}{M_{fm}} \quad (20)$$

$$V_V = \lambda M_{Cs} \quad (21)$$

$$M_{DM} = \eta_{OMC} (M_{Cv} + M_{Cs}) + \eta_{MMN} \left(\frac{\lambda \Pi_v}{\beta} M_{Cs} - \frac{\gamma}{\beta} M_{Cv} \right) \quad (22)$$