

MODELOS MATEMÁTICOS DE HORTALIZAS EN INVERNADERO: TRASCENDIENDO LA CONTEMPLACIÓN DE LA DINÁMICA DE CULTIVOS

I. L. López-Cruz^{1¶}; A. Ramírez-Arias²; A. Rojano-Aguilar³

¹Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo Estado de México, C. P. 56230. MÉXICO. Correo-e: ilopez@taurus1.chapingo.mx (¶Autor responsable)

²Departamento de Lenguajes y Computación. Universidad de Almería. Almería, ESPAÑA.

³Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco . Chapingo Estado de México. C. P. 56230. MÉXICO.

RESUMEN

El objetivo de este escrito es presentar una revisión del estado actual del conocimiento sobre modelos matemáticos (modelos explicativos o mecanicistas) de hortalizas cultivadas bajo ambiente invernadero. Se describen las características más importantes de los modelos propuestos hasta la fecha en la literatura, para los cultivos de jitomate, pepino y lechuga. Se discuten las aplicaciones más relevantes de los modelos de hortalizas cultivadas en ambientes controlados. Además se analizan aquellos aspectos que están pendientes por considerar por los modeladores de hortalizas cultivadas en invernadero.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: modelos explicativos, ecuaciones diferenciales, jitomate, pepino, lechuga.

MATHEMATICAL MODELS OF VEGETABLES IN GREENHOUSES: BEYOND A CONTEMPLATIVE VIEW OF CROP DYNAMICS

ABSTRACT

The purpose of this paper is to describe state of the art of mathematical models (explanatory or mechanistic models) for vegetable greenhouse crops. An overview of the main characteristics of some models proposed in the scientific literature for tomato, cucumber and lettuce crops is presented. Furthermore, the most important applications of the greenhouse crops models are discussed. Finally, some issues which have not yet been considered by modelers of greenhouse horticultural crops around the world are described and analyzed.

ADDITIONAL KEY WORDS: explanatory models, differential equations,

INTRODUCCIÓN

La actividad científica es inconcebible sin el desarrollo de modelos matemáticos que permitan sintetizar e incrementar el conocimiento existente sobre un sistema. La investigación agrícola y en especial la ciencia y arte de la horticultura no son la excepción. Los modelos matemáticos de hortalizas permiten probar hipótesis científicas y, además, tienen aplicación potencial tanto en educación como en la práctica de la horticultura. Los modelos permiten evaluar estrategias del manejo posible de un invernadero sin necesidad de llevar a cabo experimentos costosos. En general existen tres tipos de modelos matemáticos: modelos empíricos, modelos mecanicistas y modelos teleonómicos (Thornley y Johnson,

2000). 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 datos, ejemplos de ellos son los modelos de regresión simple y regresión múltiple, redes neuronales, modelos difusos o modelos neuro-difusos. Los modelos teleonómicos son aplicables a comportamientos dirigidos por metas y se formulan explícitamente en términos de objetivos. Los modelos explicativos o mecanicistas generalmente son modelos determinísticos (Thornley y Johnson, 2000). Normalmente, un modelo mecanicista es definido mediante un conjunto o sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no-lineales, 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.

Durante los últimos 30 años el enfoque mecanicista se ha aplicado exitosamente en la modelación de procesos de crecimiento de cultivos (Thornley y Johnson, 2000; Goudriaan y Laar, 1994). El resultado más conocido es el modelo de crecimiento de cultivos SUCROS (a Simple and Universal CROp growth Simulator) el cual puede ser considerado como un núcleo para el desarrollo de modelos más complejos de crecimiento y desarrollo de cultivos. El modelo SUCROS simula crecimiento potencial de un cultivo en campo abierto, lo cual significa suponer una disponibilidad amplia de nutrientes y agua, así como también asumir que el ambiente está libre de plagas y enfermedades. El crecimiento y desarrollo dependen solo de las variables ambientales, radiación, temperatura, concentración de CO_2 , y las características genéticas de la planta. Dado que este modelo fue desarrollado para cultivos en campo abierto, se han desarrollado recientemente otros modelos (los modelos AZKAM y SUKAM) o partes de modelos que predicen mejor bajo condiciones climáticas de invernadero (Gijzen, 1992). La metodología general para el desarrollo de modelos matemáticos predictivos de crecimiento de cultivos ha sido documentada ampliamente (Thornley y Johnson, 2000; Goudriaan y Laar, 1994; Penning de Vries *et al.*, 1989). El desarrollo de un modelo matemático mecanicista requiere de suficiente comprensión de los procesos biológicos, fisiológicos, químicos y físicos de un sistema biológico. El uso de un modelo mecanicista demanda análisis, calibración y validación apropiados.

Durante los últimos 15 años se han desarrollado modelos matemáticos para hortalizas cultivadas en condiciones de invernadero. Gary *et al.* (1998a) informaron que el número de especies estudiadas hasta ese año ascendía a 25 especies de frutales, 23 especies vegetales cultivadas a campo abierto, 20 ornamentales y 4 especies vegetales cultivadas en invernadero. De estas últimas, el jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) representaba la mitad de las referencias sobre vegetales modelados en invernadero. Algunos modelos explicativos desarrollados para algunas hortalizas importantes son: pepino (*Cucumis sativus* L.) (Marcelis, 1994a, 1994b), lechuga (*Lactuca sativa* L.) (Sweeney *et al.*, 1981; Henten, 1994; Seginer *et al.*, 1998; Seginer *et al.*, 2000), cebolla (*Allium cepa* L.) (De Visser, 1994), jitomate (Jones *et al.*, 1991; Dayan *et al.*, 1993a, 1993b; Koning de, 1993; Gary *et al.*, 1995; Heuvelink, 1996; Jones *et al.*, 1999; Abreu *et al.*, 2001), rosa (*Rosa hybrida* L.) (Kool y de Kooning, 1996; Presnov *et al.*, 2000). Gijzen *et al.* (1998), propusieron un modelo genérico para varias especies de hortalizas cultivadas en

invernadero. Otros modelos son documentados en la revisión de literatura presentada en Marcelis *et al.* (1998).

REVISIÓN CRÍTICA DE LITERATURA

Estructura de un modelo de crecimiento y desarrollo de cultivos

Un modelo de crecimiento y desarrollo de un cultivo en invernadero es definido mediante una ecuación diferencial ordinaria no-lineal:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, p), \quad x(t_0) = \beta \quad (1)$$

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

El vector de los estados (x) contiene n variables que caracterizan el cultivo como peso seco, número de frutos, índice de área foliar y otras, el vector de las entradas (u) contiene variables m tales como temperatura, concentración de CO_2 y radiación fotosintética activa. El vector (p) representa q parámetros o constantes biológicas del modelo. β representa el vector de valores de las condiciones iniciales de las variables de estado. El conjunto de ecuaciones dinámicas está definido por ecuaciones ordinarias de primer orden. dx/dt representa la tasa de cambio de las variables de estado. Dado que f es un vector con n funciones no-lineales, en general, el modelo de crecimiento no tiene solución analítica y debe ser resuelto mediante integración numérica o simulación usando una computadora digital. A partir de los estados es posible calcular salidas (variables directamente cuantificables) mediante la ecuación:

$$y = g(x, u, p) \quad (2)$$

donde $y \in R^n$.

El vector de las salidas y representa variables como peso seco, peso fresco, concentración de nitratos, etc.; g representa un conjunto de parámetros que afectan la función no lineal.

Modelos de crecimiento de jitomate

'TOMato GROWth' (Crecimiento de Tomate, TOMGRO) (Jones *et al.*, 1991) es un modelo mecanicista complejo (con 69 variables de estado) para el cultivo de jitomate, el cual predice desarrollo y producción. El modelo responde a las variables ambientales: temperatura,

radiación solar y concentración de CO₂ dentro del invernadero. Una planta de jitomate es representada mediante siete vectores conteniendo las variables de estado: número de hojas, número de los principales segmentos de brotes, número de frutos, peso seco de hojas y peciolas, peso seco de segmentos principales de brotes, peso seco de frutos y área foliar. El modelo utiliza una aproximación fuente-demanda para dividir los carbohidratos para el crecimiento de los diferentes órganos. Dayan *et al.* (1993a, 1993b) realizaron un detallado análisis del modelo TOMGRO, mediante su calibración y validación para condiciones climáticas de Israel, pero no llevaron a cabo un análisis de sensibilidad. Encontraron que el modelo tiene en cuenta los fenómenos más importantes que ocurren dentro de un invernadero y por lo tanto TOMGRO puede ser usado para estudiar los efectos de las condiciones ambientales y las prácticas de manejo sobre la producción de frutos. Este modelo es tanto esquemático como modular, lo que significa que puede ser adaptado fácilmente y sus subrutinas pueden ser reemplazadas por otras y puede ser combinado con modelos más comprensibles del invernadero y además ser utilizado en procedimientos de optimización económica. TOMGRO ha sido modificado para permitir la modelación de crecimiento y desarrollo individual de órganos de la planta, logrando así simulaciones bastante precisas del número y peso de frutos por racimo. También se le han hecho adecuaciones para describir con más precisión la expansión de área foliar y un mejoramiento a su interfaz con el usuario, lo cual permite especificar valores de parámetros y condiciones iniciales antes de la simulación (Gary *et al.*, 1995). En su última versión, TOMGRO v3.0, se compone de 574 variables de estado, simula con gran detalle el desarrollo de los frutos ya que cada fruto tiene posiciones específicas respecto al número de racimo y también en el racimo. Se modela el desarrollo del fruto de manera separada del crecimiento en biomasa lo que posibilita manejar el tamaño como una variable (Kenig y Jones, 1997). Recientemente Jones *et al.* (1999) propusieron un modelo relativamente simple para el cultivo de tomate el cual aparentemente presenta un comportamiento similar al modelo TOMGRO complejo, pero con la gran ventaja de tener solo cinco variables de estado, a saber: número de nodos del tallo principal, índice de área foliar, peso total de la planta, peso del fruto y peso del fruto maduro. Esta versión simplificada de TOMGRO fue evaluada con datos de varios experimentos e incluso datos colectados en un invernadero comercial y los resultados obtenidos muestran que el modelo puede describir con precisión el crecimiento y producción de tomate en diferentes localidades y años. Este modelo simplificado sería un candidato apropiado para usarse en estudios de optimización y control. Seginer y Loslovich (1998a) propusieron un modelo de una sola variable de estado (materia seca de la parte aérea) y lo usaron en estudios de control óptimo del clima del invernadero. En Seginer (1991), Loslovich y Seginer (1996), Seginer y Loslovich (1998b), Loslovich y Seginer (1998) el modelo TOMGRO o alguna de sus variantes fueron usadas para aplicar la teoría de

control óptimo y mostrar estrategias óptimas de cultivo mediante la optimización del clima del invernadero.

De Koning (1994) desarrolló un modelo para predecir la distribución de materia seca en jitomate con crecimiento indeterminado, cultivado en invernaderos. Este modelo consta de un total de 300 variables de estado. El número de órganos de crecimiento fue evaluado a través de la predicción de iniciación, aborto y cosecha de órganos individuales. La demanda de fotoasimilados se basó en la tasa potencial de crecimiento de órganos. La distribución de materia seca en el modelo fue proporcional a la tasa de crecimiento potencial de los órganos. El modelo es capaz de predecir en forma razonable la formación de racimos, periodo de crecimiento del fruto y la distribución de materia seca. Sin embargo, la predicción del número de frutos por racimo no fue aceptable. No obstante este modelo ha sido usado como base para el desarrollo de modelos simplificados que pueden ser usados en investigaciones de optimización y control óptimo del clima del invernadero (Tap, 2000).

'TOMato SIMulator' (Simulador de tomate, TOMSIM) (Heuvelink 1995, 1996, 1999) es un modelo de tipo explicativo con estructura modular, el cual simula crecimiento y desarrollo de jitomate. La producción de materia seca se predice por un modelo general de crecimiento para cultivos de invernadero. El modelo fue validado con diferentes fechas de plantación, densidad de plantas y conjuntos de datos de invernaderos comerciales, lo cual es importante ya que este tipo de cultivos cubre una estación completa de crecimiento, mientras que los experimentos sólo se evalúan hasta 100 días después de la plantación. El modelo permite el análisis del cultivo del jitomate y puede contribuir significativamente al sistema de soporte de manejo de cultivos. Heuvelink (1996) estudió las respuestas en crecimiento y producción de jitomate al clima del invernadero (radiación, temperatura, concentración de CO₂) y manejo del cultivo (densidad de población y poda de frutos). El modelo TOMSIM predice producción de materia seca de acuerdo con el modelo para cultivos en invernadero propuesto por Gijzen (1992), el cual, a su vez, está basado en el clásico modelo de crecimiento potencial de cultivos SUCROS y un módulo para fotosíntesis foliar desarrollado por Goudriaan y Laar (1994). En TOMSIM la tasa de crecimiento potencial es simulada basándose en la tasa de fotosíntesis foliar, la intercepción de luz, tasa de respiración de mantenimiento y la eficiencia de la conversión de carbohidratos a materia seca estructural. La distribución de materia seca es simulada de acuerdo con la tasa de crecimiento potencial de los órganos. El modelo fue validado mediante datos colectados en experimentos independientes y también en mediciones llevadas a cabo en invernaderos comerciales. Las predicciones resultaron ser bastante aceptables comparadas con las mediciones; sin embargo, la simulación del área específica de hoja, aborto de flores y frutos no fueron muy precisos.

Aunque Heuvelink (1996) concluyó que TOMSIM es el modelo de simulación para tomate cultivado en invernadero mejor validado e incluso sugiere la posibilidad de usar este modelo para predecir el comportamiento de otros cultivos [por ejemplo, pimiento (*Capsicum annum* L.)], se requiere de más estudios de calibración y validación del modelo antes de ser ampliamente aceptado. De todas maneras, TOMSIM es un buen punto de inicio para investigadores que deseen iniciar estudios de modelación y simulación de hortalizas en invernadero. Recientemente simplificaciones de TOMSIM han sido usadas para generar estrategias de control óptimo de enriquecimiento de CO₂ en tomates cultivados en invernadero (Chalabi *et al.*, 2002a; Chalabi *et al.*, 2002b).

El modelo "Tompousse" (Modelo simplificado para tomate, TOMPOUSSE) (Abreu *et al.*, 2001; Gary *et al.*, 1996) para jitomate está orientado a simular la producción semanal del cultivo de jitomate bajo invernadero a partir de información disponible dentro de las condiciones de producción. Las etapas más importantes de elaboración de rendimiento son la transmisión promedio de radiación por el invernadero, la intercepción de radiación por la cubierta vegetal (que depende del índice de área foliar) y su conversión en biomasa (que depende en particular de la cantidad de CO₂ y de la distribución de una fracción de esta biomasa a los frutos). El modelo permite simular en forma adecuada las curvas de producción bajo condiciones climáticas contrastantes como son los de la Bretaña francesa y el Mediterráneo medio (Gary *et al.*, 1996). "Tompousse" ha sido adaptado a invernaderos de plástico sin calefacción de Portugal y predice la producción semanal en términos de número y peso fresco de frutos cosechados. Esos datos son importantes para los agricultores porque ello les permite planear, hacia el futuro, el mercado de su producción. Este modelo requiere poca cantidad de datos climáticos y del cultivo.

Modelos de crecimiento de pepino

El modelo de crecimiento 'FRUIT GROWTH', (Crecimiento de frutos, FRUGRO) para el cultivo de pepino fue propuesto por Marcelis, (1994a, 1994b). En FRUGRO la planta es descrita por un conjunto de órganos de demanda los cuales obtienen asimilados para el crecimiento a partir de un depósito común. Los asimilados son resultado de la fotosíntesis y son acumulados en un almacén. Parte de los asimilados son usados por respiración de mantenimiento y el resto está disponible para el crecimiento. La respiración de crecimiento no es tomada en cuenta. La tasa de crecimiento de los órganos de demanda depende de la cantidad de asimilados disponibles y también de la fuerza de demanda o la capacidad potencial de los órganos para acumular asimilados. La unidad de tiempo del modelo es un día.

El número de frutos de una planta es calculado como una función de las tasas de aparición de frutos, de frutos abortados y de frutos cosechados. Se calcula la edad de

cada fruto y su fuerza de demanda correspondiente. Posteriormente los asimilados disponibles son distribuidos entre los órganos demandantes en forma proporcional a su fuerza de demanda comparada con la suma total de fuerza de demanda de todos los demandantes en conjunto. El modelo usa la ecuación de Michaelis-Menten para describir la respuesta de crecimiento de un órgano a la cantidad de asimilados disponibles. El modelo consta de funciones de demanda potencial. Como es difícil medir el nivel de asimilados disponible para crecimiento, la relación de la tasa de crecimiento total de la planta sobre la tasa de crecimiento potencial total, es usada como una medida del nivel de asimilados disponible para crecimiento. La tasa de crecimiento potencial de un fruto de pepino depende de la temperatura y el estado de desarrollo del fruto. La ecuación de Richards es usada para describir el crecimiento de un fruto de pepino. El modelo usa el submodelo SUKAM (Gijzen, 1992) para calcular la tasa de crecimiento total diaria de la planta. Los datos de entrada del modelo son la temperatura diaria y radiación fotosintéticamente activa, medidos dentro del invernadero. Marcelis (1994b) reportó predicciones adecuadas del modelo en estudios de validación usando dos experimentos de crecimiento de pepinos en invernaderos holandeses. El modelo fue también mejorado y validado posteriormente en invernaderos de producción comercial (Marcelis y Gijzen, 1998).

Modelos de crecimiento para lechuga

Varios modelos han sido propuestos para modelar el crecimiento de lechugas y por tratarse de un cultivo relativamente simple se ha usado ampliamente en estudios de optimización y control. Sweeney *et al.* (1981) propusieron un modelo de lechugas de dos variables de estado: materia seca de reservas y materia seca estructural; se ignora materia seca de la raíz. Las variables de entrada del modelo son flujo de luz y temperatura. El modelo predice materia seca total, área foliar y área foliar efectiva. A pesar de que contiene solamente dos variables de estado, la tasa de cambio de éstas implica un cálculo de funciones algebraicas no-lineales, a saber: funciones exponenciales de crecimiento para la materia seca estructural y una función exponencial para la tasa de fotosíntesis. El modelo de Sweeney *et al.* (1981) contiene varios parámetros que requieren ser estimados. El modelo fue validado con datos obtenidos en invernaderos en Inglaterra y predijo apropiadamente el comportamiento de la producción de materia seca total del cultivo.

Henten (1994a, 1994b) propuso un modelo para el cultivo de lechuga el cual se compone de dos variables de estado: el peso seco estructural y el peso seco no estructural. El modelo asume que en un tiempo dado la planta está completamente definida por las dos variables. El peso seco total, es la suma de peso seco estructural y no estructural. El peso seco no-estructural está representado por el contenido de carbohidratos y almidón.

El peso seco estructural está constituido por los componentes restantes del total del peso seco de la planta por ejemplo, el componente de paredes celulares y citoplasma. Las variables de entrada son: radiación fotosintéticamente activa, temperatura y concentración de CO₂ medidas dentro del invernadero. El modelo presenta 17 parámetros que deben ser estimados. Henten y Straten (1994) llevaron a cabo un análisis de sensibilidad del modelo que muestra el papel preponderante que los parámetros eficiencia de conversión de materia seca no-estructural a materia seca estructural y eficiencia de uso de luz tienen en el comportamiento de las predicciones del modelo. Su estudio de validación usando datos colectados en dos invernaderos holandeses en los ciclos otoño-invierno e invierno-primavera mostró respuestas adecuadas del modelo al comportamiento de la materia seca durante el ciclo del cultivo. Este modelo ha sido usado en varios estudios de optimización y control óptimo del clima del invernadero (Henten, 1994b). Recientemente este modelo fue calibrado usando datos de un experimento de crecimiento de lechugas bajo un clima templado (Ramírez *et al.*, 2001).

Recientemente, un nuevo modelo fue propuesto para el cultivo de lechuga (Seginer *et al.*, 1998). El modelo 'Nltrate COntrol in LETtuce' (Control de nitratos en lechugas, NICOLET) consta de dos variables de estado: contenido de carbono no-estructural y contenido de carbono estructural expresado en moles por unidad de superficie. Como en otros modelos de crecimiento de cultivos, el núcleo del modelo NICOLET es un balance de carbono. El contenido de carbono no-estructural, principalmente contenido en las vacuolas, se origina de la asimilación del proceso fotosintético, el cual es afectado por la luz y la cantidad disponible de CO₂. La respiración de mantenimiento y respiración de crecimiento dan cuenta de estos recursos bajo la influencia de la temperatura. La producción de una unidad de carbono estructural para el crecimiento necesita unidades adicionales para respiración de crecimiento. El modelo asume que la función que satura la producción cuando el follaje se cierra actúa en la misma forma sobre el crecimiento.

Tanto la fotosíntesis como el crecimiento continúan sin ninguna restricción mientras la concentración de carbono no-estructural en las vacuolas permanece dentro de ciertos límites. La concentración de carbono en las vacuolas puede ser calculada a partir de las variables de estado suponiendo que las vacuolas ocupan una proporción fija del volumen total de la planta. Pero si debido a un cambio en las condiciones ambientales la concentración de carbono no-estructural se aproxima a cero, entonces el crecimiento es reducido. En el modelo, esta transición es calculada por una función de conmutación la cual tiene un valor igual a la unidad en caso de niveles no-inhisorios de carbono no-estructural pero tiende rápidamente a cero cuando el almacén de asimilación está vacío. Cuando el carbono

asimilado en las vacuolas alcanza niveles elevados, una función de conmutación similar provoca que el proceso fotosintético se detenga. La concentración de nitrógeno se calcula algebraicamente a partir de la correlación negativa entre la concentración de carbono y la concentración de nitrógeno presentes en las vacuolas. Se supone en el modelo que el suministro de nitrógeno demandado está siempre disponible. En otras versiones más complejas del modelo NICOLET esta suposición no es tan estricta (Seginer *et al.*, 2000). Las salidas del modelo son variables que pueden ser medidas directamente tales como peso seco de la planta, peso fresco y contenido de nitratos. Estas variables son calculadas a partir de los estados del modelo de acuerdo con ecuaciones meramente algebraicas. El modelo NICOLET a sido usado para generar estrategias de control óptimo de los niveles de nitratos en lechugas (Ioslovich y Seginer, 2002; López *et al.*, 2003).

Modelo de crecimiento y desarrollo de rosas

Dayan *et al.* (2002) desarrollaron un modelo ('Rose Grow', Crecimiento de rosas) que describe el crecimiento del dosel y el desarrollo de brotes florales de rosas en invernadero. La acumulación de biomasa es una función de fotosíntesis, respiración y eficiencia de conversión de carbohidratos a materia seca y se incluyen los efectos de índice de área foliar, luz, CO₂ y temperatura. El modelo utiliza incrementos de tiempo basados en una dinámica diaria y lazos de trabajo rápidos ocurriendo en un lapso de 30 minutos. En esta dinámica se calculan las variables temperatura, CO₂, y radiación fotosintética activa, así como los procesos de fotosíntesis y respiración. El crecimiento es calculado en la dinámica diaria en la que se actualizan las variables de estado. Se registra la dinámica de aparición de brotes, de muerte de ramas, de corte de tallos florales, de crecimiento de las ramas que desarrollan flores y ramas de orilla que no desarrollan flores. Para cada tipo de rama se contabilizan tres partes diferentes de la planta: tallo, hoja y yema floral. El patrón de crecimiento de cada rama desde su iniciación hasta su madurez se divide en clases de edad, de manera que cada rama del mismo tipo y clase similar se define como "grupo de edad" y se describe de acuerdo a las variables de estado sobre los órganos de la rama: número, peso y longitud de tallos, número, peso y longitud de hojas, número, peso y volumen de yemas florales. El modelo ha tomado muchas de las ideas que subyacen en TOMGRO y en HORTISIM.

Un modelo de crecimiento para varios cultivos y el clima del invernadero

El modelo 'HORTIcultural SIMulator' (Simulador de hortalizas, HORTISIM), fue construido a partir de modelos existentes, desarrollados por varios grupos de investigación. Incluye aspectos del crecimiento de cultivo y clima de invernadero considerados en forma integrada. HORTISIM contiene siete submodelos (Clima, Clima del invernadero, Suelo, Cultivo, Manejo del Invernadero,

Manejo del Suelo y Manejo del Cultivo) más un manejador de procesos de simulación. Las condiciones del clima dentro del invernadero pueden ser calculadas a partir del clima externo. El uso de energía, CO₂ y agua también puede ser cuantificado. La fotosíntesis de cultivo, su producción y partición de materia seca y el crecimiento individual de frutos en cultivos vegetales pueden ser simulados (Gijzen *et al.*, 1998). El submodelo que describe el cultivo implementa varias características del modelo de crecimiento potencial de cultivos SUCROS. Se han reportado buenos resultados de experimentos de validación de este modelo en varias situaciones. HORTISIM es un modelo importante ya que es genérico y no específico para un cultivo. Dado que este modelo combina un modelo del cultivo, un modelo del invernadero, un modelo del manejo del clima en el invernadero, y un modelo del manejo del cultivo, puede ser usado en estudios sobre los efectos del diseño del invernadero, equipo, estrategias para el control del clima del invernadero y manipulación del cultivo, sobre la producción del cultivo y uso de recursos. Los conceptos computacionales involucrados en el simulador HORTISIM ha sido discutidos por Cohen y Gijzen (1998). El Cuadro 1 presenta una síntesis de los principales modelos para hortalizas cultivadas en invernadero investigadas en esta revisión.

Importancia de las herramientas de programación en los modelos de cultivos

Debido a que las ecuaciones matemáticas que representan el modelo de un cultivo difícilmente tienen solución analítica se requiere de un programa de computadora (modelo de simulación) (Ittersum *et al.*, 2003). El modelo de simulación representa conceptos del modelo

matemático y permite estudiar su comportamiento. Los modelos de cultivos en invernadero han sido desarrollados considerando la experiencia acumulada para modelos de cultivo a campo abierto. Así los modelos TOMSIM, FRUGRO, HORTISIM, y el modelo de lechuga propuesto por Henten (1994) han sido desarrollados usando herramientas de programación con las que los científicos estaban ya familiarizados, por tanto el lenguaje de programación FORTRAN ha sido una herramienta muy utilizada. En específico, ambientes de desarrollo como FSE (Fortran Simulation Environment) (Kraalingen, 1995) y FST (FORTRAN Simulation Translator) (Kraalingen *et al.*, 2003), éste último permite desarrollar conceptos en términos de ecuaciones matemáticas que son convertidos en un programa FORTRAN con archivos de datos FSE. Este programa FORTRAN está bien estructurado y puede ser ejecutado utilizando subrutinas matemáticas desarrolladas por el usuario y aquellas de la librería estándar (Kraalingen *et al.*, 2003). Para TOMGRO también se ha utilizado FORTRAN 77 como lenguaje de programación (Kening y Jones, 1997).

Una de las características importantes de FORTRAN/FSE es que permite a los modelos funcionar en cualquier plataforma computacional, lo cual facilita el desarrollo de módulos genéricos para los componentes del modelo. Este ambiente de simulación permite programación estructurada para desarrollar control de calidad e intercambio de módulos entre modelos, y tiene un excelente sistema de comunicación de errores (Ittersum *et al.*, 2003).

De fundamental relevancia es que los modelos deben ser desarrollados con una estructura eficiente y flexible, que pueda ser implementada dividiendo el sistema en

CUADRO 1. Modelos dinámicos de crecimiento para hortalizas cultivadas en invernadero.

Modelo	Objetivos	Referencias
SUCROS	Crecimiento potencial de cultivos	Goudriaan y van Laar, 1994.
ALCEPAS	Crecimiento potencial en cebolla	De Visser, 1994
AZKAM	Simulación de fotosíntesis para cultivos en invernadero	Gijzen, 1992
SUKAM	Simulación de crecimiento de biomasa para cultivos en invernadero	Gijzen, 1992
TOMGRO	Crecimiento potencial de tomate	Jones <i>et al.</i> , 1991; Jones <i>et al.</i> , 1999; Dayan <i>et al.</i> , 1993
De Koning	Crecimiento y desarrollo de tomate	De Koning, 1994
TOMSIM	Crecimiento y desarrollo de tomate	Heuvelink, 1996
TOMPOUSSE	Crecimiento semanal de tomate en invernadero	Abreu <i>et al.</i> , 2001
SIMULSERRE	Manejo de cultivo de tomate en invernadero	Gary <i>et al.</i> , 1998
HORTISIM	Crecimiento potencial de hortalizas y simulación del clima del invernadero	Gijzen <i>et al.</i> , 1998
FRUGRO	Crecimiento y partición de biomasa en pepino	Marcelis, 1994
Sweeney	Crecimiento de lechuga	Sweeney <i>et al.</i> , 1981
van Henten	Crecimiento de lechuga	van Henten, 1994
NICOLET	Crecimiento y contenido de nitratos en lechuga	Seginer <i>et al.</i> , 1998
ROSEGROW	Crecimiento y desarrollo de rosas	Kool y De Koning, 1996, Dayan <i>et al.</i> , 2002, Presnov <i>et al.</i> , 2000

unidades biológicas o módulos (Reynolds y Acock, 1997; Jones *et al.*, 2001), cuya esencia implica que: 1) se relacionen directamente con componentes o procesos del mundo real, 2) sus variables de entrada y salida sean valores mensurables y 3) la comunicación entre módulos únicamente sea posible mediante las variables de entrada y salida (Reynolds y Acock, 1997). Los modelos de cultivos también debieran cumplir con la premisa de ser genéricos, es decir, aplicables a un rango de cultivos o plantas (Reynolds y Acock, 1997). Así, la modularidad y genericidad son características deseables en los modelos de crecimiento.

La aplicación del diseño y programación orientada a objetos facilita cumplir con las características antes mencionadas. Este enfoque se ha utilizado para generar ambientes de desarrollo de modelos de cultivos, como GePSi (Generic Plant Simulator) (Chen y Reynolds, 1997), GPM (Generic Plant Modelling) (Sequeira *et al.*, 1997) o bien GPSF (Generic Plant Simulator Framework) para cultivos en invernadero con crecimiento indeterminado, en el que se ha rediseñado y programado TOMGRO y posteriormente reutilizado y adaptado, en menos de tres días-programador, para la programación de FRUGRO (Gauthier *et al.*, 1999).

Considerando que los modelos de simulación están siendo utilizados para el control de las variables climáticas de invernaderos, una herramienta que ha venido a ser utilizada es el ambiente de programación MATLAB, ya que incorpora diferentes herramientas matemáticas y de control, y permite interfaces con otros lenguajes de programación como FORTRAN y C. MATLAB ha sido utilizado para simulación de modelos de cultivos y diversas estrategias de control en lechuga (López, 2002; Seginer *et al.*, 2000), en tomate (Tap, 2000; Rodríguez, 2002) y rosa (Dayan *et al.*, 2002).

Aplicaciones de modelos matemáticos de hortalizas en invernaderos

Los modelos de hortalizas tienen diversas aplicaciones. Pueden ser utilizados como ayuda para la toma de decisiones en la producción en invernaderos, en la investigación científica, en la definición de políticas de desarrollo agrícola y en la enseñanza de la horticultura (Gary *et al.*, 1998b).

En la producción de hortalizas en invernadero los modelos tienen aplicabilidad en el manejo de los cultivos, desde el punto de vista operacional o bien de planeación de un ciclo de producción. También proveen información cuantitativa para la toma de decisiones y ayudan a hacer estimaciones de rendimiento potencial y necesidades de agua (Gary *et al.*, 1998a). Gary (1999), señala tres aplicaciones de modelos de cultivos en invernadero: el control del ambiente en los niveles operativo y táctico. La

predicción de la productividad, así como también la educación de estudiantes y trabajadores. Por ejemplo, la optimización de la concentración de CO₂, temperatura y humedad debe estar basada en modelos acoplados de balances de masa y energía con las tasas de transpiración y fotosíntesis neta.

Los modelos que predicen producción son de importancia estratégica en las relaciones entre productores y compradores. Los modelos pueden ser usados como una herramienta para la estimación de la producción potencial y para la identificación de los factores principales limitantes en un área de producción. La producción en invernaderos es un sistema complejo y requiere muchas decisiones diariamente. El entrenamiento de técnicos y estudiantes puede ser más rápido usando simuladores que permitan al usuario comparar un número ilimitado de políticas para el control del clima o el cultivo (Gary, 1999).

En la investigación científica, un buen modelo debe auxiliar al investigador proveyéndole de direcciones inesperadas y perspectivas novedosas, por medio de la unificación del conocimiento y la explicación de los fenómenos, y no debido sencillamente a la mera recapitulación o descripción de los comportamientos biológicos ya bien conocidos (Salvador, 1993). Por sus características particulares los cultivos de hortalizas pueden ser considerados como herramientas de laboratorio para estudiar y modelar diferentes procesos de los vegetales (Gary *et al.*, 1998a). Así pues, los modelos se constituyen como una herramienta muy importante para el desarrollo de la investigación postulando conceptos a partir de los datos disponibles, desarrollando teorías y poniéndolas a prueba por medio de la comparación de predicciones de la teoría propuesta con el comportamiento de los sujetos bajo estudio (Salvador, 1993; Jones y Tardieu, 1998; Le Bot *et al.*, 1998; Lentz, 1998). Por ejemplo el modelo TOMSIM ha permitido a Heuvelink (1996) probar la hipótesis que el floema es importante en la distribución de asimilados. El modelo NICOLET se basa en la hipótesis de que existe una correlación negativa entre asimilados y niveles de NO₃ en lechugas. El uso de modelos, tanto del ambiente físico del invernadero como del crecimiento del cultivo en un invernadero, permite el control automático del proceso de crecimiento y la optimización del proceso de producción.

En la enseñanza puede ser muy útil el uso de modelos que permitan enseñar la respuesta de los vegetales al ambiente y al manejo del cultivo, así como las diferencias entre especies de hortalizas. Pueden ayudar también en la demostración de las interacciones entre procesos o componentes de los sistemas de producción de cultivos (Gary *et al.*, 1998a). SIMULSERRE (Gary *et al.*, 1995; Gary *et al.*, 1998b) es un simulador del ambiente del invernadero y el crecimiento para el cultivo de jitomate que fue diseñado con la finalidad de conectar la demanda de nuevas herramientas educativas con los avances en la modelación

del invernadero y crecimiento de cultivos. El programa computacional del modelo permite que un instructor defina estudios de caso tales como costos y beneficios en el uso de enriquecimiento con CO₂, podas de racimos, número de frutos, tamaño de frutos y otras variables. Los estudiantes exploran el problema y derivan conclusiones a partir del análisis de varias simulaciones. SIMULSERRE contiene dos grandes módulos: uno que implementa el modelo físico del invernadero y otro que describe el modelo del cultivo. El modelo del invernadero permite simular el comportamiento del clima dentro del invernadero y las estrategias para alcanzar los puntos de referencia deseados. El modelo del invernadero contiene balances estáticos de energía y CO₂. Los principales flujos considerados son intercambios de energía debidos a la ventilación, intercambios a través de la cubierta, intercambio de energía del aire y suelo, el flujo de calor producido por la radiación solar, el suministro artificial de calor y el calor latente generado por la transpiración del cultivo. Se asume que los puntos de referencia deseados pueden ser logrados con los dispositivos de control. Dado lo anterior, el clima del invernadero es determinado mediante balances de masa y energía.

SIMULSERRE implementa además un modelo de jitomate basado en el modelo TOMGRO, pero a diferencia de la versión original de este modelo, en SIMULSERRE se simulan los intercambios de CO₂ cada hora y el crecimiento y desarrollo de los órganos vegetativos y reproductivos cada día. La planta es dividida en simpodiums y sobre cada uno de ellos edad fisiológica, área y peso seco de hojas y edad fisiológica y peso seco de entrenudos de tallos son simulados como un todo, mientras que la edad fisiológica y peso seco de frutos del racimo son simulados individualmente. Esto permite calcular salidas a escala de órganos lo cual, entre otras cosas, permite la representación gráfica del crecimiento y desarrollo de la planta. En este modelo el estudiante puede definir varios parámetros del invernadero y los puntos de referencia y varios escenarios pueden ser representados en una interfase gráfica (Gary *et al.*, 1995).

A pesar de que los modelos de hortalizas en invernadero se pueden aplicar en la toma de decisiones en la unidad de producción, la situación no es halagüeña ya que la mayoría de éstos no son utilizados por los agricultores, a pesar de que en los últimos 20 años ha habido importantes avances en el desarrollo de sistemas más completos y amigables con el usuario (Keaney, 1992; Lentz, 1998).

DISCUSIÓN

El desarrollo de modelos matemáticos de hortalizas ha tenido un importante avance y se ha constituido en una importante herramienta de investigación. Una razón para tal éxito es la versatilidad de esta técnica, ya que ha permitido la posibilidad de abordar marcos conceptuales y

la horticultura ha ofrecido estudios de caso originales, por ejemplo, la fotosíntesis o la arquitectura de las plantas. Los ingenieros requieren de procedimientos para solucionar problemas prácticos, y la horticultura es un campo donde la predicción de rendimientos, la evaluación de políticas de acción o la optimización de procesos puede ser muy importante (Gary *et al.*, 1998a).

Los logros más importantes en el modelado de cultivos se reflejan en 1) el significativo incremento de artículos publicados (en términos de conceptos y herramientas de modelado) en un campo donde la alta diversidad de especies y sistemas de cultivos puede ser un obstáculo (Gary *et al.*, 1998a), y 2) en la gran cantidad de sistemas de soporte de decisiones para horticultura, desarrollados por institutos científicos y por firmas comerciales (Lentz, 1998). En cultivos en invernadero los modelos siguen concentrados en el estudio de pocas especies: tomate, lechuga, pepino y rosa. Los modelos de desarrollo y crecimiento de hortalizas explicativos han llegado a tener como características relevantes la simulación de intercepción de radiación solar por el dosel, la simulación de fotosíntesis bruta (Marcelis *et al.*, 1998), la distribución de biomasa (Heuvelink 1996, 1999; Marcelis, 1994b), y en el caso de lechuga la dinámica del carbono (Seginer *et al.*, 1998, 2000).

No obstante, aún queda mucho por hacer, sobre todo en cuanto a la modelación de la gran diversidad de cultivos, el balance de agua de las plantas, la absorción de minerales, la interacción de las plantas con plagas y enfermedades e interacciones genéticas, la variabilidad entre plantas, la simulación de desarrollo de área foliar, la respiración de mantenimiento, el aborto de órganos, el contenido de materia seca y calidad del producto (Gary *et al.*, 1998a; Marcelis *et al.*, 1998; Jones, *et al.*, 1998; Le Bot *et al.*, 1998). Los principales retos de los modelos en horticultura de acuerdo con Gary *et al.* (1998a) y Gary (1999) son la necesidad de generar modelos lo suficientemente genéricos para permitir una modelación rápida de nuevas especies.

El uso de estructuras modulares de programación y genéricas utilizando otros enfoques de diseño y programación (metodología orientada a objetos) y el diseño de formatos estándares para datos de entrada y salida, está llegando a ser reconocido y aplicado como lo demuestran los trabajos realizados en esta dirección (Gauthier *et al.*, 1999; Sequeira *et al.*, 1997; Chen y Reynolds, 1997). Ello no significa que este enfoque sea el único que garantice modularidad y generalidad.

En la optimización de recursos para la producción en invernadero, el uso de modelos de cultivo es indispensable ya que se requiere del conocimiento de la dinámica del cultivo en su relación con el ambiente de manera que permita evaluar diversas posibilidades de actuación para

minimizar costos y maximizar beneficios. Así, la aplicación de modelos como parte de las estrategias de control de invernaderos hacia estrategias de control óptimo es factible, ello involucra el concepto de separación de responsabilidades, donde los efectos del corto plazo, incluyendo fotosíntesis y evapotranspiración, son manejados por un controlador óptimo de modelo predictivo, mientras que los efectos de largo plazo son abordados por el agricultor, con soporte desde un sistema de toma de decisiones flexible basado en modelos de cultivo, siempre que ellos estén disponibles (Straten *et al.*, 2000)

Para que los sistemas de toma de decisiones, que llevan incorporados modelos de cultivos, sean utilizados deben cumplir varias condiciones esenciales: 1) que el sistema debe ganar la aprobación y confianza de los usuarios finales, 2) ser capaz de adaptarse a las condiciones y requerimientos cambiantes, y 3) los diferentes componentes de los sistemas de información deben operar en armonía para proveer soporte mutuo a los usuarios del sistema (Lentz, 1998).

Los modelos simulan una planta promedio pero los cultivos en invernaderos son siempre heterogéneos, por lo tanto es necesario caracterizar con una precisión mayor la variabilidad del ambiente. Existe la necesidad de modelos explicativos con más detalle de procesos básicos como respiración de mantenimiento. Es necesario construir modelos matemáticos que incorporen aspectos de calidad del producto, esto demanda el desarrollo de modelos que consideren forma, color, sabor, contenido y vida en anaquel, para vegetales de fruto; para ornamentales: forma y color. En éstos modelos se deberían utilizar los conceptos de arquitectura y morfología de las plantas. Se pueden mejorar los modelos mecanicistas de hortalizas en invernadero conectando modelos fisiológicos con modelos morfológicos, como se empieza a investigar en otros cultivos (Hanan y Hearn, 2003). Algunas propiedades del desarrollo del cultivo son pobremente consideradas en muchos modelos, tales como absorción de nutrientes, morfogénesis, y formación de calidad. Finalmente, existe un divorcio entre el desarrollo de modelos y el proceso de toma de decisiones. Un enfoque a desarrollar es la reducción de los modelos complejos a modelos sencillos y fáciles de utilizar, empleando agregación razonada, ya que aunque se pueden obtener modelos sencillos de caja negra o técnicas como redes neuronales, estos eliminan el carácter explicativo de los modelos mecanicistas.

CONCLUSIONES

Los modelos mecanicistas de hortalizas desarrollados hasta ahora se han concentrado en el estudio de procesos fundamentales como producción y distribución de biomasa, procesos de fotosíntesis y respiración. A pesar de lo anterior se requiere aún del estudio más preciso de algunos procesos como respiración de mantenimiento para lograr

modelos más realistas.

Los modelos de las hortalizas más estudiadas han tenido la finalidad 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 (lechuga, tomate). Si embargo se requiere de modelos más simples para que no una solución analítica de un problema de optimización dinámica sea posible, sino aún una solución numérica en un tiempo razonable de computación.

Las aplicaciones encontradas en la literatura para los modelos de crecimiento de hortalizas en invernadero son: investigación científica, educación y manejo de cultivos. Es en la educación y en investigación donde estos modelos tienen, por ahora, el mayor impacto de aplicación, mientras que en la toma de decisiones habrá que esperar mayor desarrollo, conocimiento y confianza de los usuarios para que los modelos sean ampliamente utilizados.

LITERATURA CITADA

- ABREU, P.; MENESES J. F.; GARY, C. 2001. Tompousse: a model of yield prediction for tomato crops. Calibration study for unheated plastic greenhouses, *Acta Horticulturae* 519: 141-150.
- COHEN, S.; GIJZEN, H. 1998. The implementation of software engineering concepts in the greenhouse crop model HORTISIM. *Acta Horticulturae* 456: 431-440.
- CHALABI, Z. S.; BIRO, A.; BAILEY, B. J.; AIKMAN, D. P.; COCKSHULL, K. E. 2002a. Optimal control strategies for carbon dioxide enrichment in greenhouse tomato crops. Part I: Using pure carbon dioxide. *Biosystems Engineering* 81(4): 421-431.
- CHALABI, Z. S.; BIRO, A.; BAILEY, B. J.; AIKMAN, D. P.; COCKSHULL, K. E. 2002b. Optimal control strategies for carbon dioxide enrichment in greenhouse tomato crops. Part II: Using the exhaust gases of natural gas fired boilers. *Biosystems Engineering* 81(3): 323-332.
- CHEN, J. L.; REYNOLDS, J. F. 1997. GePSi: A generic plant simulator based on object-oriented principles. *Ecological Modelling* 94: 53-66.
- DAYAN, E.; VAN KEULEN, H.; JONES, J. W.; ZIPORI, I.; SHMUEL, D.; CHALLA, H. 1993a. Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model. I. Description of the model. *Agricultural Systems* 43: 145-164.
- DAYAN, E.; VAN KEULEN, H.; JONES, J.W.; ZIPORI, I.; SHMUEL, D.; CHALLA, H. 1993b. Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model. II. Field Calibration and Validation, *Agricultural Systems* 43: 165-183.
- DAYAN, E.; PRESNOV, E.; FUCHS M.; BEN ASHER, J. 2002. Rose grow: A model to describe greenhouse rose growth. *Acta Horticulturae* 593: 63-70.
- DE VISSER, C. L. M. 1994. ALCEPAS, an onion growth model based on SUCROS87: Development of the model. *Journal of Horticultural Science* 69: 501-518.
- DE KONING, A. N. M. 1994. Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach. PhD Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen. The Netherlands. 240 p.

- GARY, C.; JONES, J. W.; TCHAMITCHIAN, M. 1998a. Crop modelling in horticulture: state of the art. *Scientia Horticulturae* 74: 3-20.
- GARY, C.; BARCZI, J. F.; BERTIN, N.; TCHAMITCHIAN, M. 1995. Simulation of individual organ growth and development on a tomato plant: a model and a user-friendly interface. *Acta Horticulturae* 399: 199-205.
- GARY, C.; BAILLE, A.; NAVARRETE, M.; ET ESPANET, R. 1996. "Tompousse", un modele simplifié de prévision du rendement et du calibre de la tomate, pp. 100-109. *In: Actes du Séminaire de l'AIP Serres*. A. BAILLE (ed.). INRA. Avignon. France.
- GARY, C. 1999. Modelling greenhouse crops: state of the art and perspectives. *Acta Horticulturae* 495: 317-322.
- GARY, C.; TCHAMITCHIAN, M.; BERTIN, N.; CHARASSE, L.; REBILLARD, A.; CARDI, J. P. 1998b. *SIMULSERRE*: An educational software simulating the greenhouse-crop system. *Acta Horticulturae* 456: 451-458.
- GAUTHIER, L.; GARY, C.; ZEKKI, H. 1999. GPSF: A generic and object-oriented framework for crop simulation. *Ecological Modelling* 116: 253-268.
- GIJZEN, H.; HEUVELINK, E.; MARCELIS, L.F.M.; DAYAN, E.; COHEN, S.; FUCHS, M.; CHALLA, H. 1998. HORTISIM: A model for greenhouses crops and greenhouse climate. *Acta Horticulturae* 456: 441-450.
- GIJZEN, H. 1992. Simulation of photosynthesis and dry matter production of greenhouse crops, Simulation Report CABO-TT Nr 28, 1992 CABO-DLO. Wageningen. The Netherlands. 69 p.
- GOUDRIAAN, J.; VAN LAAR H. H. 1994. Modelling Potential Crop Growth Processes. Textbook with Exercises. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, the Netherlands. 238 p.
- HANAN, J. S.; HEARN, A. B. 2003. Linking physiological and architectural models of cotton. *Agricultural Systems* 75: 47-77.
- HEUVELINK, E. 1995. Dry matter production in a tomato crop: measurements and simulations. *Annals of Botany* 75: 369-379.
- HEUVELINK, E. 1996. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. PhD Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen. The Netherlands. 326 p.
- HEUVELINK, E. 1999. Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development. *Annals of Botany* 83: 413-422.
- IOSLOVICH, I.; SEGNER, I. 1996. Normalized costate variable for seasonal optimization of greenhouse tomato production. *Acta Horticulturae* 417: 87-97.
- IOSLOVICH, I.; SEGNER, I. 1998. Approximate seasonal optimization of the greenhouse environment for multi-state-variable tomato model. *Transactions of the ASAE* 41(4): 1139-1149.
- IOSLOVICH, I.; SEGNER, I. 2002. Acceptable nitrate concentration of greenhouse lettuce: two optimal policies. *Biosystems Engineering* 83(2): 199-215.
- JONES, J. W.; KENIG, A.; VALLEJOS, C. E. 1999. Reduced state-variables tomato growth model. *Transactions of the ASAE* 42(1): 255-265.
- JONES, J. W.; DAYAN, E.; ALLEN, L. H.; VAN KEULEN H.; CHALLA, H. 1991. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Transactions of the ASAE* 3(2): 663-672.
- JONES, H. G.; TARDIEU, F. 1998. Modelling water relations of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74: 21-46.
- JONES, J. W.; KEATING, B. S. A.; PORTER, CH. 2001. Approaches to modular model development. *Agricultural Systems* 70: 421-443.
- KEANEY, M. 1992. User requirements of computer models in Decision Support Systems in orchards. *Acta Horticulturae* 313: 165-171.
- KENIG, A.; JONES, J. W. 1997. TOMGRO v3.0 A dynamic model of tomato growth and yield. In *Optimal Environmental control for Indeterminate Greenhouse Crops*. SEGNER, I.; JONES, J.W.; GUTMAN P.; VALLEJOS, C. E. BARD (eds.). Research Report No. IS-1995-91RC. Ch. II-5. Agricultural Engineering Dept. Technion. Haifa, Israel.
- KOOL, M. T. N.; DE KONING, J. C. M. 1996. Analysis of rose crop production. *Acta Horticulturae* 424: 79-86.
- LE BOT, J.; ADAMOWICZ, S.; ROBIN, P. 1998. Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74: 47-83.
- LENTZ, W. 1998. Model applications in horticulture: a review. *Scientia Horticulturae* 74: 151-174.
- LÓPEZ C., I. L. 2002. Efficient evolutionary algorithms for optimal control. PhD Thesis, Wageningen University. Wageningen, The Netherlands, 126 p.
- LÓPEZ C., I. L.; VAN WILLIGENBURG, G.; VAN STRATEN, G. 2003. Optimal control of nitrate in lettuce by a hybrid approach: differential evolution and ACW gradient algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture* 40: 179-197.
- MARCELIS, L. F. M. 1994a. A simulation model for dry matter partitioning in cucumber. *Annals of Botany* 74: 43-52.
- MARCELIS, L. F. M. 1994b. Fruit and dry matter partitioning in cucumber. PhD Thesis. Wageningen University. Wageningen, The Netherlands. 173 p.
- MARCELIS, L. F. M.; GIJZEN, H. 1998. Evaluation under commercial conditions of a model of prediction of the yield and quality of cucumber fruits. *Scientia Horticulturae* 476: 171-181.
- MARCELIS, L. F. M.; HEUVELINK, E.; GOUDRIAN, J. 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74: 83-111.
- PENNING DE VRIES, F. W.; JANSEN, D. M.; TEN BERGE, H. F. M.; BAKEMA A. 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. PUDOC. Wageningen, the Netherlands. 271 p.
- PRESNOV, E.; DAYAN, E.; FUCHS, M.; PLAUT, Z.; MATAN, E. 2000. Rose flowers production in greenhouses. *Acta Horticulturae* 534: 335-341.
- RAMÍREZ A., A.; LÓPEZ C., I. L.; ROJANO, A. A. 2001. Calibration of a Dynamic Lettuce Growth Model for a Soilless System in a Mild Climate. Proceedings of the fourth International Symposium on Mathematical Modelling and Simulation in Agricultural and Bio-Industries (M²SABI'01), 12-14 June. Haifa, Israel. pp. 1-8.
- REYNOLDS, J.; ACOCK, B. 1997. Modularity and genericness in plant and ecosystem models. *Ecological Modelling* 94: 7-16
- RODRÍGUEZ, D. F. 2002. Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero. Tesis Doctoral. Universidad de Almería. Almería, España. 366 p.
- SALVADOR, R. J. 1993. Uso de la simulación computarizada para avanzar la investigación agrícola en los países en vía de desarrollo. Eighth International Congress on Research in Electrical Sciences. Instituto Tecnológico de la Laguna. 20-24 septiembre 1993. Torreón Coahuila. México. 16 p.
- SEGNER, I. 1991. Optimal greenhouse temperature trajectories for a multi-state variable tomato model. Proceedings IFAC Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture. Matsuyama, Japan. pp. 73-79.

- SEGINER, I.; BUWALDA, F.; STRATEN, G. VAN. 1998. Nitrate concentration in greenhouse lettuce: a modeling study. *Acta Horticulturae* 456: 189-197.
- SEGINER, I., IOSLOVICH, I. 1998a. A single state variable model to mimic TOMGRO for control applications. *Acta Horticulturae* 456: 93-100.
- SEGINER, I.; IOSLOVICH, I. 1998b. Seasonal optimization of the greenhouse environment for a simple two-stage crop growth model. *J. Agric. Eng. Res.* 70: 145-155.
- SEGINER, I.; VAN STRATEN, G.; BUWALDA, F., 2000. Lettuce growth limited by nitrate supply. *Acta Horticulturae* 507:141-148.
- SEQUEIRA, R. A.; OLSON, R. L.; MCKEINION, J. M. 1997. Implementing generic, object-oriented models in biology. *Ecological Modelling* 94: 17-31.
- SWEENEY, D. G.; HAND, D. W.; SLACK, G.; THORNLEY, J. H. M. 1981. Modelling the growth of winter lettuce. In: *Mathematics in Plant Physiology*. ROSE, D.A.; CHARLES-EDWARDS, D.A. (Eds.) Academic Press. London. 217-229.
- TAP, F. 2000. Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production. PhD Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen The Netherlands. 127 p.
- THORNLEY, J. H. M.; JOHNSON, I. R. 2000. *Plant and Crop Modelling, A Mathematical Approach to Plant and Crop Physiology*, The Blackburn Press. New Jersey, USA.. 669 p.
- VAN HENTEN, E. J.. 1994a. Validation of a dynamic lettuce growth model for greenhouse climate control. *Agricultural Systems* 45: 55-72.
- VAN HENTEN, E. J.; VAN STRATEN, G. 1994. Sensitivity analysis of a dynamic growth model of lettuce. *J. Agric. Eng. Res.* 59: 19-31.
- VAN HENTEN, E. J. 1994b. Greenhouse climate management: an optimal control approach. PhD Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen. The Netherlands. 329 p.
- VAN ITTERSUM, M. K.; LEFFELAAR, P. A.; VAN KEULEN, H.; KROPFF, M. J.; BASTIAANS, L.; GOUDRIAN, J. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy* 18: 201-234.
- VAN KRAALINGEN, D. W. G.; RAPPOLD, C.; VAN LAAR, H. H. 2003. The FORTRAN Simulation Translator, a simulation language. *European Journal of Agronomy* 18: 359-361.
- VAN KRAALINGEN, D. W. G. 1995. The FSE System for Crop Simulation, Version 2.1. Quantitative Approaches in System Analysis No. 1. C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology. Wageningen, The Netherlands. 27 p.
- VAN STRATEN, G.; CHALLA H.; BUWALDA, F. 2000. Towards user accepted optimal control of greenhouse climate. *Computers and Electronics in Agriculture* 25: 221-238.