

PREDICCIÓN DEL CRECIMIENTO POTENCIAL DE TOMATE DE CÁSCARA MEDIANTE EL MODELO SUCROS

PREDICTION OF THE HUSK TOMATO POTENTIAL GROWTH USING THE SUCROS MODEL

Irineo Lorenzo López-Cruz^{1*}; Ramón Arteaga-Ramírez¹; Mario Vázquez-Peña²; Rutilo López-López³; Carlos Robles-Bañuelos²

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, ²Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. km 1 Carretera Huimanguillo-Cárdenas, Huimanguillo, Tabasco. MÉXICO.

Correo-e: loci61@hotmail.com (*Autor responsable), mavazquez.coahuila@gmail.com; rutilolopez62@prodigy.net.mx

RESUMEN

SUCROS (a Simple and Universal Crop Growth Simulator) es un modelo mecanicista que explica el crecimiento de un cultivo sobre la base de procesos como fotosíntesis y respiración, influenciados por condiciones ambientales. El objetivo del presente estudio fue investigar en qué medida el modelo SUCROS puede predecir el crecimiento potencial y desarrollo del cultivo de tomate de cáscara. Se compararon las predicciones de producción de materia seca de la parte aérea, biomasa de las hojas (verdes y secas), biomasa de los frutos, biomasa de los tallos de la planta, así como el índice de área foliar; contra mediciones obtenidas de un experimento donde el cultivo se manejó con condiciones óptimas de agua y nutrientes, y estuvo libre de plagas y enfermedades. A diferencia de los análisis de crecimiento, los modelos explicativos como SUCROS, relacionan el crecimiento y desarrollo del cultivo con procesos fisiológicos. El grado de correspondencia de las simulaciones contra las mediciones fue aceptable para la mayoría de las condiciones de calibración después de que el modelo fue calibrado mediante el ajuste de cinco parámetros que afectan más su comportamiento, siendo ($R^2 > 0.92$) para el caso de la biomasa de la parte aérea, ($R^2 > 0.95$) para biomasa de tallos, ($R^2 > 0.79$) para biomasa foliar, ($R^2 > 0.83$) para biomasa de frutos y ($R^2 > 0.58$) para el índice de área foliar.

Palabras clave adicionales: *Physalis ixocarpa* Brot., modelo explicativo, modelo matemático, estimación de parámetros, simulación.

ABSTRACT

SUCROS (a Simple and Universal Crop Growth Simulator) is a mechanistic model, which explains crop growth based on process such as photosynthesis and respiration, under the influence of environmental conditions. The aim of the present research was to investigate to what extent the SUCROS model can predict potential growth and development of a husk tomatoes crop. In order to do that, model predictions of total above-ground dry matter, biomass of leaves, biomass of fruits, biomass of stems of the plants, and leaf area index, were compared against measurements that came from one potential crop growth experiment. In contrast to growth analysis, explanatory models, such as SUCROS, relate crop growth and development with fundamental physiological processes. Afterwards the model calibration was carried out, by adjusting the five model most sensitive parameters, the degree of fit among simulations and measurements was acceptable for almost all calibrated conditions, being ($R^2 > 0.92$) in case of total above-ground dry matter, ($R^2 > 0.95$) for biomass of stems, ($R^2 > 0.79$) for leaves biomass, ($R^2 > 0.83$) for fruits biomass and ($R^2 > 0.58$) for the leaf area index.

Additional key words: *Physalis ixocarpa* Brot., explanatory model, mathematical model, parameter estimation, simulation

INTRODUCCIÓN

El cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) es relevante en la agricultura mexicana, tanto por superficie sembrada, como por valor de la producción (Calyecac *et al.*, 2007). A pesar de que existen muchos estudios sobre mejoramiento genético y manejo agronómico del cultivo (Castro *et al.*, 2000; Ramos *et al.*, 2002), el uso de enfoques cuantitativos para estudiar el comportamiento del crecimiento de tomate de cáscara es prácticamente inexistente. A diferencia de los análisis de crecimiento (Hunt, 1978; 1982), que se basan en modelos empíricos y ajuste de curvas, los modelos explicativos relacionan el crecimiento y desarrollo de los cultivos con procesos fisiológicos fundamentales como la fotosíntesis y respiración. El modelo de simulación de cultivos SUCROS (a Simple and Universal Crop Growth Simulator) (Goudriaan y Van Laar, 1994; Van Laar *et al.*, 1997) utiliza un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias no-lineales para estudiar el comportamiento y predecir la producción de biomasa de cultivos anuales (Bouman *et al.*, 1996; Van Ittersum *et al.*, 2003). SUCROS es un modelo que permite describir el crecimiento potencial de un cultivo en función de procesos fisiológicos como fotosíntesis y respiración, afectados por las variables ambientales temperatura, radiación global y concentración de bióxido de carbono. El crecimiento potencial en un cultivo es aquél que se obtiene cuando las plantas no tienen limitaciones de agua y nutrientes y están libres de plagas y enfermedades. Entonces, suponiendo un valor constante para bióxido de carbono del aire (CO₂), la tasa de cambio de la acumulación de biomasa es una función de la radiación solar y la temperatura y las características del cultivo. Como el modelo es para dar cuenta del crecimiento potencial, el efecto de la humedad sobre la fotosíntesis es ignorado y la tasa de crecimiento depende directamente de la tasa de asimilación de CO₂ del dosel. Su valor diario se calcula a partir de la radiación absorbida por el follaje y las propiedades fotosintéticas de las hojas individuales. Parte de los carbohidratos producidos por la fotosíntesis se usan para mantener la biomasa existente (respiración de mantenimiento) y el resto es empleado para formar nueva biomasa estructural. Además se considera una pérdida de biomasa en la respiración de crecimiento. La biomasa estructural se divide entre los diferentes órganos de la planta mediante el uso de coeficientes que dependen del estado fenológico de desarrollo. El modelo SUCROS es importante porque ha sido la base para el desarrollo de modelos más detallados para cultivos, tanto en campo abierto (Bouman *et al.*, 1996; Wolf, 2002; Van Ittersum, 2003;), como en invernadero (Heuvelink, 1995). Se usó el modelo SUCROS por su generalidad y por estar planteado para cultivos en campo abierto, a diferencia de modelos específicos desarrollados para cultivos en invernadero tales como TOMGRO, TOMSIM, TOMPOUSSE, entre otros (López *et al.*, 2005). La predicción del crecimiento de tomate de cáscara mediante modelos matemáticos puede permitir el desarrollo de estrategias de manejo del cultivo bajo diferentes condiciones climáticas que se encuentran en nuestro país y para distintas condiciones tecnológicas de producción. El objetivo del presente trabajo fue investigar en qué medida el modelo SUCROS puede predecir el crecimiento potencial y desarrollo del cultivo de tomate de cáscara.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estructura del modelo de simulación SUCROS para crecimiento potencial de cultivos

Una descripción completa del modelo SUCROS usando código computacional en lenguaje de simulación Fortran Simulation Translator (FST) se encuentra en Goudriaan y Van Laar (1994) y Van Laar *et al.* (1997). Las variables de estado del modelo son: estado de desarrollo (x_{edes} , adimensional), índice de área foliar (x_{iaf} , m²·m⁻²), la biomasa de raíces (x_{raiz} , g·m⁻²), de hojas verdes (x_{hv} , g·m⁻²), de las hojas secas (x_{hs} , g·m⁻²), de los tallos (x_{tallo} , g·m⁻²) y de los frutos (x_{frutos} , g·m⁻²). El estado de desarrollo se cuantifica mediante una variable adimensional, que toma un valor de 0 (cero) cuando se asocia a la emergencia, valor de 1 para la floración y valor de 2 para la maduración. La tasa de cambio del estado de desarrollo es calculada mediante la Ecuación (1):

$$\frac{dx_{edes}}{dt} = f(x_{edes}, T) \quad (1)$$

donde $f(x_{edes}, T)$ es una función empírica de la tasa de desarrollo, que depende de la temperatura media diaria (°C). La tasa de cambio del índice de área foliar (IAF, subíndice iaf) se calcula mediante la Ecuación (2):

$$\frac{dx_{iaf}}{dt} = Crec_{iaf} - Mort_{iaf} \quad (2)$$

donde la tasa de crecimiento del índice de área foliar $Crec_{iaf}$ (m²·m⁻²·d⁻¹) se determina mediante la Ecuación (3) si la planta se encuentra en estado de maduración, siendo SLA (m²·g⁻¹) el parámetro de área foliar específica (Ecuación 3):

$$Crec_{iaf} = SLA \cdot Crec_{foliar} \quad (3)$$

Para la fase de crecimiento juvenil la tasa de crecimiento del IAF se define por la Ecuación (4):

$$Crec_{iaf} = (x_{iaf} \cdot \exp(RGRL \cdot TEFF \cdot \Delta T) - 1) / \Delta T \quad (4)$$

donde RGRL (°Cd⁻¹) es el coeficiente de tasa de crecimiento relativa durante la fase de crecimiento exponencial del área foliar y TEFF (°C) es la temperatura efectiva. La tasa de crecimiento de biomasa foliar ($Crec_{foliar}$, g·m⁻²·d⁻¹) es una función de la tasa de crecimiento de la biomasa del cultivo ($Crec_{Tot}$, g·m⁻²·d⁻¹) afectada por dos funciones empíricas que especifican la fracción de biomasa para área foliar ($fr_h(x_{edes})$) y para brotes ($fr_b(x_{edes})$), dependiendo del estado de desarrollo (Ecuación 5):

$$Crec_{foliar} = fr_h(x_{edes}) \cdot fr_b(x_{edes}) \cdot Crec_{Tot} \quad (5)$$

La función de crecimiento de la biomasa total ($Crec_{Tot}$), incluyendo traslocación ($Transl$), se calcula con la Ecuación (6):

$$Crec_{Tot} = (Asim_{Tot} - RMant + 0.947 \cdot Transl \cdot CFST \cdot 30 / 12) / ASRQ \quad (6)$$

donde CFST es un parámetro llamado fracción de carbono para los tallos y ASRQ (constante) es el requerimiento de asimilados (CH_2O) para la producción de biomasa estructural (Goudriaan y Van Laar, 1994). La tasa de asimilación bruta diaria ($AsimTot$, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) se calcula mediante la Ecuación (7):

$$AsimTot = 30 / 44 \cdot A_{\max} (1 - \exp(-\varepsilon I / A_{\max})) \quad (7)$$

donde ε ($\text{g}\cdot\text{J}^{-1}$) es el coeficiente de eficiencia inicial de uso de la luz por las hojas individuales, I es la radiación global diaria, A_{\max} ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) es la tasa máxima de asimilación de CO_2 y la relación 30/44 representa los pesos moleculares de CH_2O y CO_2 , respectivamente. La asimilación de dióxido de carbono por el dosel se lleva a cabo mediante una integración Gaussiana en cinco puntos durante el día, con base en una estimación en tres puntos del follaje de la cantidad de radiación absorbida por el mismo, calculando la radiación fotosintéticamente activa (I , $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), tanto difusa como directa, a partir de la longitud astronómica del día, la radiación global diaria y el coeficiente de transmisividad atmosférica (Goudriaan y Van Laar, 1994). La tasa de respiración de mantenimiento ($RMant$, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) se calcula tomando en cuenta la respiración de hojas verdes, tallos, raíces y frutos, afectada por dos funciones que consideran el efecto de la temperatura del aire y el efecto del estado desarrollo sobre la tasa de respiración (Ecuación 8):

$$RMant = (M_{hv} \cdot x_{hv} + M_{tallo} \cdot x_{tallo} + M_{raiz} \cdot x_{raiz} + M_{frutos} \cdot x_{frutos}) \cdot f_{resp}(T) \cdot f_{edes}(x_{edes}) \cdot f(d_{emerg}) \quad (8)$$

donde la función $f_{resp}(T)$ da cuenta del efecto de la temperatura sobre la respiración de mantenimiento (Ecuación 9), $f_{edes}(x_{edes})$ del estado de desarrollo (Ecuación 10) y $f(d_{emerg})$ es igual a la unidad a partir de la emergencia y cero para días anteriores:

$$f_{resp}(T) = QIO^{(T_{air} - T_{ref})/10} \quad (9)$$

$$f_{edes}(x_{edes}) = \frac{x_{hv}}{x_{hv} + x_{hs}} \quad (10)$$

Asimismo, M_{hv} , M_{tallo} , M_{raiz} , M_{frutos} ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) son coeficientes de respiración de mantenimiento para los diferentes órganos.

La tasa de mortalidad del índice de área foliar ($Mort_{iaf}$, $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) depende de una tasa relativa de mortalidad (RDR , d^{-1}), específica de la especie, que está en función del estado de desarrollo y al autosombreo del índice de área foliar (Ecuación 11):

$$Mort_{iaf} = \max(RDRDV, RDRSH) \cdot x_{iaf} \quad (11)$$

donde RDRDV es la razón de muerte relativa debido al desarrollo del envejecimiento y RDRSH es la razón de muerte relativa debido al autosombreo en alta LAI. La tasa de cambio de la biomasa de hojas verdes es calculada mediante la Ecuación (12):

$$\frac{dx_{hv}}{dt} = Crec_{foliar} - Mort_{foliar} \quad (12)$$

donde:

$$Mort_{foliar} = x_{hv} Mort_{iaf} / x_{iaf} \quad (13)$$

Las tasas de cambio de la biomasa de hojas muertas, raíces y tallos se calculan mediante las Ecuaciones (14), (15) y (16), respectivamente:

$$\frac{dx_{hs}}{dt} = Mort_{foliar} \quad (14)$$

$$\frac{dx_{raiz}}{dt} = (1 - fr_b(x_{edes})) \cdot CrecTot \quad (15)$$

$$\frac{dx_{tallo}}{dt} = fr_t(x_{edes}) \cdot fr_b(x_{edes}) \cdot CrecTot - Transl \quad (16)$$

donde la fracción de la biomasa total asignada a los tallos $fr_t(x_{edes})$ es una función empírica que depende del estado de desarrollo. Finalmente, la tasa cambio para la biomasa de los órganos de almacenamiento (frutos) se calcula mediante la Ecuación (17):

$$\frac{dx_{frutos}}{dt} = fr_f(x_{edes}) \cdot fr_b(x_{edes}) \cdot CrecTot \quad (17)$$

La traslocación es igual a cero hasta la floración y a partir de entonces se calcula mediante la Ecuación (18):

$$Transl = 0.2 \cdot x_{tallos} f(x_{edes}) \quad (18)$$

Las variables de salida, en SUCROS, son la biomasa de las hojas (y_h , $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$), la biomasa total de la parte aérea (y_{bas} , $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$), la biomasa total de la planta considerando raíces (y_b , $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) y el índice de cosecha (y_{hi}), las cuales se calculan mediante las ecuaciones (19) a (22), respectivamente:

$$y_h = x_{hv} + x_{hs} \quad (19)$$

$$y_{bas} = x_{hv} + x_{hs} + x_{tallo} + x_{org} \quad (20)$$

$$y_b = x_{hv} + x_{hs} + x_{tallo} + x_{org} + x_{raiz} \quad (21)$$

$$y_{hi} = x_{org} / (x_{hv} + x_{hs} + x_{tallo} + x_{org}) \quad (22)$$

La función de interceptación de la radiación ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) se calcula mediante la Ecuación (23):

$$PAR_{abs} = I (1 - \exp(-KDF \cdot x_{iaf})) \quad (23)$$

donde I ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) es la radiación solar global. La temperatura efectiva se calcula mediante la Ecuación (24):

$$TEFF = \max\left(0, \frac{1}{2}(T_{\max} - T_{\min}) - T_{base}\right) \quad (24)$$

Descripción del experimento de crecimiento de tomate de cáscara

El estudio se realizó en el Campo Experimental de la Estación Meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo, en Chapingo, Estado de México, situado geográficamente entre las coordenadas 19° 16' 52" latitud norte y 99° 39' 0" longitud oeste. Se cultivó tomate de cáscara con sistema de riego por goteo durante el periodo comprendido entre los meses de marzo a junio de 2007. El clima de la localidad es del tipo Cb(Wo)(W)(i')g, que corresponde a un templado subhúmedo con lluvias en verano, una época seca en invierno y con poca oscilación térmica entre 5 y 7 °C. La temperatura media anual es de 15.5 °C, siendo mayo el mes más caliente y enero el más frío. La precipitación media anual es de 664 mm.

El material vegetal que se utilizó fue una familia de medios hermanos maternos (F3) obtenida a partir de la variedad "CHF1-Chapingo" de la Universidad Autónoma Chapingo. La siembra de semillas para la producción de plántulas se realizó el 24 de febrero de 2007, en charolas de poliestireno (unicel) de 200 cavidades; el sustrato utilizado fue Peatmost más vermiculita; el trasplante fue realizado el 30 de marzo (día Juliano (dj) 89) y la fecha de la última cosecha fue el día 30 de junio (dj=181). El arreglo de plantación fue de 1.5 m entre hileras y 0.45 m entre plantas, obteniéndose una densidad de 16,122 plantas-ha⁻¹. Para garantizar el crecimiento del cultivo sin limitaciones de agua se aplicó el 100 % de la evapotranspiración de referencia mediante el método de Penman-Monteith como lámina de riego en tiempo real. La fórmula de fertilización empleada en el fertirriego fue 200-110-50. Las fuentes de fertilizantes fueron: sulfato de amonio (21-00-24), fosfato monoamónico (12-60-00), nitrato de potasio (13-02-44) y ácido nítrico al 55 %. Se fertilizó cada semana. Se registraron diariamente las variables meteorológicas en el sitio como son: radiación global, temperaturas máximas y temperaturas mínimas (Figura 1), cuyos valores fueron obtenidos de una estación automatizada industrial GroWeather (Davis Instruments). Se realizaron muestreos destructivos de las plantas, a partir de la fecha de trasplante. El primer muestreo se utilizó para obtener las condiciones iniciales del modelo de simulación. Los días Julianos (dj) de muestreo fueron: 103, 117, 124, 138, 145, 159, 166 y 177, cuando se cosecharon de 3-10 plantas. Se separaron los diferentes órganos de la planta: raíces, tallos, hojas y frutos. Se registró el peso fresco de cada una de las partes de las plantas mediante una balanza electrónica. Se midió el área foliar mediante un integrador de área LICOR LI-3100. Las muestras fueron secadas en una estufa a una temperatura de 75-80 °C durante 1-3 días dependiendo de la edad de la planta. Mayores detalles del experimento de crecimiento del cultivo de tomate de cáscara se encuentran en López *et al.* (2009).

Simulación y calibración del modelo SUCROS

El modelo SUCROS se encuentra programado en el lenguaje de simulación Fortran Simulation Translator (Van Kraalingen *et al.*, 2003; Goudriaan y Van Laar, 1994). Para la presente investigación se programaron, además, las ecuaciones del modelo en el lenguaje de programación de Matlab (The

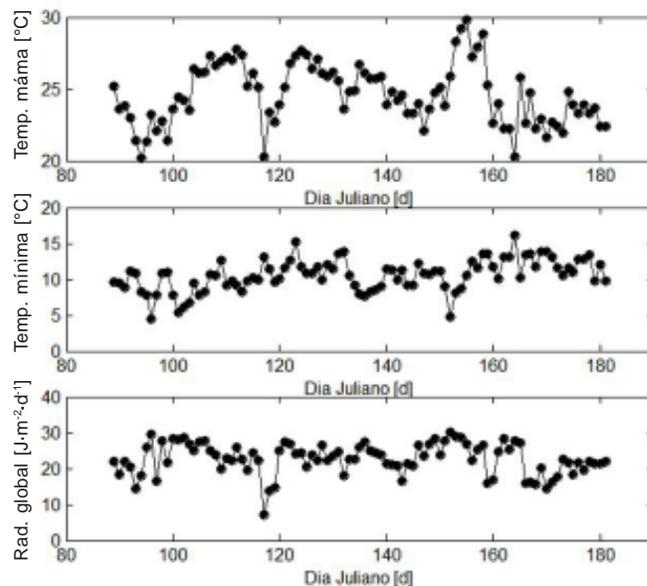


Figura 1. Variables climáticas empleadas como entradas para el modelo de simulación SUCROS para crecimiento potencial de cultivos.

MathWorks, Inc, 1984-2008) Las ecuaciones diferenciales se resolvieron numéricamente mediante el método de Euler, con tamaño de paso de integración fijo de un día ($\Delta T = 1$). Para las simulaciones se especificaron las condiciones iniciales de las variables de estado, obtenidas a partir del primer muestreo destructivo, índice de área foliar ($x_{iaf}(0) = 0.00621$), estado de desarrollo ($x_{edes}(0) = 0$), biomasa de raíces ($x_{raiz}(0) = 0.077 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), biomasa para hojas verdes ($x_{hv}(0) = 0.103 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), biomasa de tallos ($x_{tallos}(0) = 0.073 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), biomasa para hojas secas ($x_{hs}(0) = 0.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) y biomasa para frutos ($x_{frutos}(0) = 0.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), así como las constantes latitud del sitio (19°), densidad de población (1.92 plantas·m⁻²), día de emergencia (89), en adición a las variables climáticas mostradas en la Figura 1. Para la calibración se utilizó el algoritmo de mínimos cuadrados no-lineales disponible en las herramientas de optimización de Matlab (The MathWorks, Inc., 1984-2008). De los 18 parámetros del modelo SUCROS se estimó un subconjunto que probablemente afecta en mayor medida su comportamiento, por el papel que éstos tienen en el proceso de crecimiento del cultivo: la eficiencia inicial del uso de la luz (ϵ) por las hojas individuales (para Ecuación 7), tasa máxima de asimilación de CO₂ (A_{max}) (para Ecuación 7), el coeficiente de extinción de la radiación (KDF), que se emplea en el cálculo de la radiación absorbida por el follaje y la tasa de asimilación de CO₂, la tasa de crecimiento relativa (RGRL) durante la fase de crecimiento exponencial del área foliar (Ecuación 4) y el área foliar específica (SLA) (Ecuación 3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 1 presenta los resultados de la calibración del modelo SUCROS para crecimiento potencial de tomate de cáscara.

Cuadro 1. Coeficientes de determinación (R^2) de la ecuación de regresión entre variable (s) medida (s) y variable (s) estimada (s), obtenidos de la calibración del modelo SUCROS, para el experimento de crecimiento de tomate de cáscara sin acolchado.

Variable ajustada	Biomasa Total (y_b)	Biomasa Tallos (x_{tallos})	Biomasa Frutos (x_{frutos})	Biomasa Hojas (y_b)	IAF (x_{iaf})
Biomasa total	0.9910	0.9967	0.9362	0.8072	0.8682
Tallos	0.9892	0.9967	0.9385	0.8008	0.7885
Frutos	0.9857	0.9947	0.9488	0.7938	0.5852
Hojas	0.9230	0.9551	0.8310	0.8669	0.9582
Total+Tallos	0.9910	0.9966	0.9349	0.8084	0.8829
Total+Frutos	0.9885	0.9960	0.9452	0.7983	0.7083
Total+Hojas	0.9910	0.9966	0.9346	0.8086	0.8844
Total+Tallos+Frutos	0.9891	0.9962	0.9443	0.7994	0.7351
Total+Tallos+Hojas	0.9910	0.9964	0.9333	0.8098	0.8958
Total+Tallos+Hojas+Frutos	0.9901	0.9966	0.9415	0.8022	0.7925
Total+Tallos+Hojas+Frutos+IAF	0.9909	0.9963	0.9338	0.8095	0.9036

Se utilizaron las combinaciones de las variables de estado y salida que se muestran en la columna 1 (variable ajustada). En todos los casos se calculó el grado de ajuste mediante el coeficiente de determinación de la ecuación de regresión resultante entre las mediciones y las predicciones obtenidas mediante el modelo. En las columnas 2-6 se muestran los valores de las variables que predice el modelo, después de cada calibración. Los valores del coeficiente de determinación mostrados en el Cuadro 1 indican que sólo en el caso que se calibró de forma aislada la biomasa de los frutos se obtuvo un ajuste pobre para el índice de área foliar ($R^2=0.58$), pero en todos los otros casos las variables de estado y variable de salida biomasa total se predijeron con precisión. La combinación de variables calibradas mejoró ligeramente la calidad del ajuste reflejada en el coeficiente de determinación. El Cuadro 2 muestra los valores de los parámetros calibrados. Los valores de los parámetros cambiaron de acuerdo a la variable calibrada. Es posible que el problema de optimización planteado en cada calibración presente varias soluciones (sea multimodal). Esto requiere ser investigado con mayor detalle usando algoritmos globales de optimización. Sin embargo, a pesar de la variación obtenida en los parámetros en todas las calibraciones, aparentemente los parámetros eficiencia del uso de la radiación solar (ϵ), tasa máxima de fotosíntesis (A_{max}) y coeficiente de extinción de la radiación (KDF), se pueden estimar con mayor precisión que la tasa relativa de crecimiento (RGRL) y el coeficiente área foliar específica (SLA).

Las Figuras 2-6 presentan dos simulaciones correspondientes a dos calibraciones. La primera consideró conjuntamente la variable de salida biomasa total de la parte aérea, así como las variables de estado biomasa de los tallos, biomasa foliar, biomasa de frutos e índice de área foliar. Los coeficientes de determinación correspondientes se muestran en el último renglón del Cuadro 1. La segunda simulación es resultado de la calibración llevada a cabo para la variable de interés correspondiente, la cual puede ser considerada como el mejor ajuste para la variable estudiada.

La Figura 2 muestra una comparación entre la predicción del modelo de la biomasa de la parte aérea y las mediciones obtenidas del experimento. Puede observarse que las predicciones siguen la tendencia de las observaciones. El coeficiente de determinación para la biomasa total fue mayor a 0.90 para las diferentes calibraciones del modelo. Esto significa que el modelo SUCROS considera los procesos fundamentales asociados con la acumulación de la biomasa de la parte aérea del cultivo de tomate de cáscara. Cuando se calibró únicamente la biomasa total se obtuvo prácticamente el mismo resultado ($R^2=0.9910$) que la calibración ponderada ($R^2=0.9909$), por lo cual los valores de los parámetros estimados fueron similares, así como las simulaciones mostradas en la Figura 2.

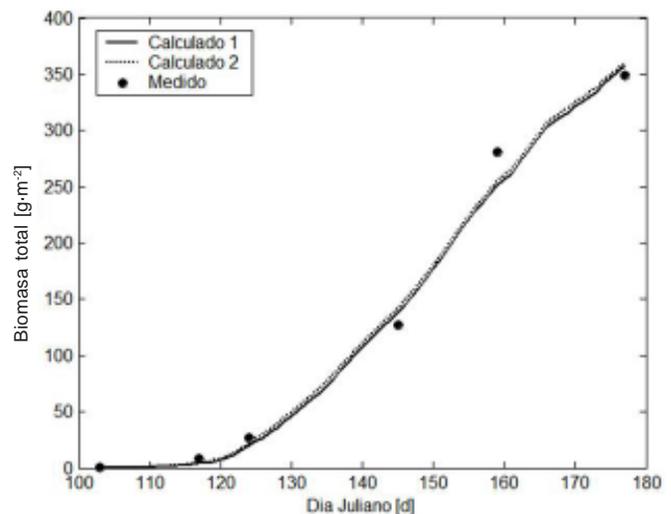


Figura 2. Simulación de la biomasa total de la parte aérea del cultivo de tomate de cáscara bajo condiciones de crecimiento potencial en Chapingo, Estado de México.

La Figura 3 muestra una comparación entre la predicción de la biomasa de los tallos y las mediciones. Puede observarse que en el caso de la calibración ponderada el modelo subestima la biomasa al final del ciclo del cultivo.

El grado de ajuste medido mediante el coeficiente de determinación resultó ser mayor que 0.95 para las distintas calibraciones. Esto significa que la tasa de crecimiento de la biomasa de los tallos es adecuadamente descrita por el modelo y que éste toma en cuenta los procesos más importantes. Aunque el coeficiente de determinación fue similar para la calibración que utilizó solamente la biomasa de los tallos ($R^2=0.9967$), comparada con la ponderada ($R^2=0.9963$), el ajuste a las mediciones fue mejor en el caso de la primera (Figura 3), lo que se refleja en los valores considerablemente diferentes de los parámetros calibrados.

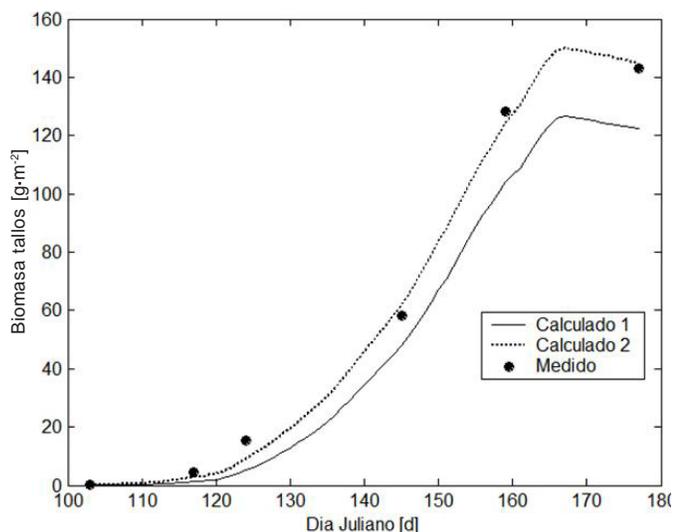


Figura 3. Simulación de la biomasa de los tallos de un cultivo de tomate de cáscara bajo condiciones de crecimiento potencial, en Chapingo, Estado de México.

La Figura 4 muestra la comparación entre la predicción de la biomasa foliar (de hojas verdes más hojas secas) y las mediciones. El grado de ajuste entre mediciones y predicciones para todas las calibraciones estuvo entre 0.79 y 0.87. Esto signi-

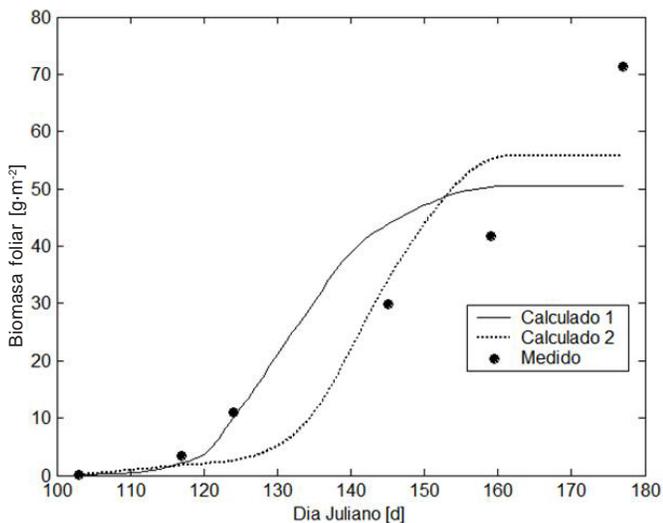


Figura 4. Simulación de la biomasa foliar (hojas secas y verdes) de un cultivo de tomate de cáscara bajo condiciones de crecimiento potencial, en Chapingo, Estado de México.

fica que es posible todavía mejorar el grado de ajuste entre las predicciones del modelo y las observaciones, posiblemente considerando procesos más detallados como la distribución de la biomasa foliar del cultivo de tomate de cáscara de acuerdo al estado de desarrollo. La calibración ponderada mostró un coeficiente de determinación ($R^2=0.8095$) inferior al obtenido con la calibración basada en la biomasa foliar solamente ($R^2=0.8669$). En este caso las diferencias entre los parámetros calibrados fueron mayores.

La Figura 5 presenta la comparación entre la predicción y mediciones de la biomasa para los frutos. El grado de ajuste para las distintas calibraciones resultó con un coeficiente de determinación mayor entre 0.83 y 0.95. También aquí es posible mejorar la calidad de predicción mediante una distribución de la biomasa entre los distintos órganos de acuerdo al estado de desarrollo específico para el cultivo de tomate de cáscara. El ajuste fue mejor para la calibración que consideró solamente la biomasa de los frutos como variable ($R^2=0.9488$), en comparación con aquella ponderada ($R^2=0.9338$). El ajuste fue diferente debido a los valores diferentes de los parámetros calibrados.

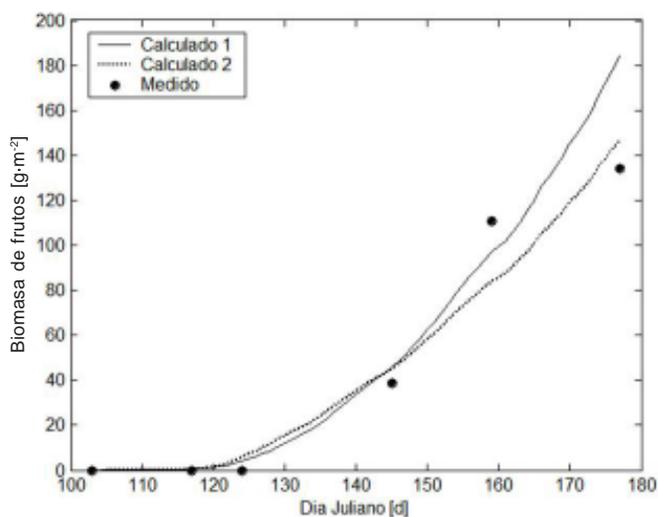


Figura 5. Simulación de la biomasa de los frutos de un cultivo de tomate de cáscara bajo condiciones de crecimiento potencial, en Chapingo, Estado de México

La Figura 6 muestra una comparación entre la simulación del índice de área foliar y las mediciones, donde las predicciones siguen en forma aceptable el comportamiento de las mediciones. El grado de ajuste varió dependiendo del tipo de calibración realizada, entre 0.58 y 0.97. Esto significa que para estimar en forma apropiada el índice de área foliar es mejor utilizar la biomasa total del cultivo durante la calibración o una calibración ponderada. Cuando se calibró solamente el índice de área foliar se obtuvo un mejor ajuste ($R^2=0.9670$, no mostrado en el Cuadro 1) que cuando se usó la calibración ponderada ($R^2=0.9036$). La diferencia en los ajustes mostrados en la Figura 6 se debe a los diferentes valores de los parámetros que se estimaron en cada calibración.

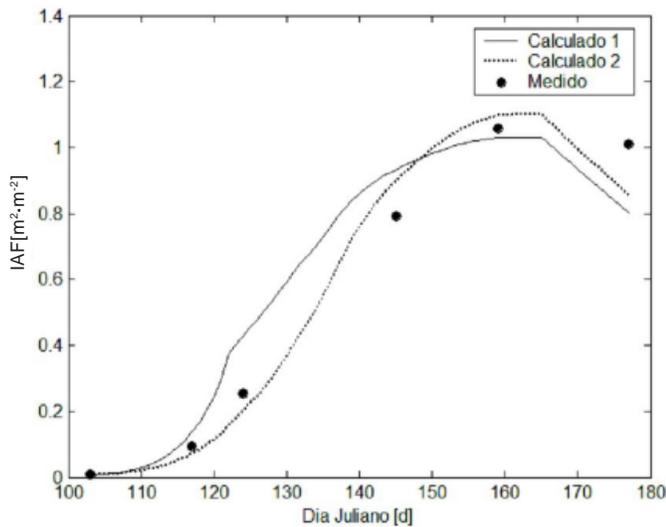


Figura 6. Simulación del índice de área foliar de un cultivo de tomate de cáscara bajo condiciones de crecimiento potencial, en Chapingo, Estado de México.

Las simulaciones usaron las tablas de información empírica contenidas por el modelo SUCROS para crecimiento potencial de cultivos; sin embargo, mediante una estimación de parámetros (Cuadro 1) se muestra que el modelo puede predecir en forma aceptable el índice de área foliar, la biomasa de los frutos, la biomasa foliar, la biomasa de los tallos y la biomasa de la parte aérea de un cultivo de tomate de cáscara con crecimiento potencial. Los valores de los parámetros calibrados (Cuadro 2) están dentro de los rangos reportados por la literatura para otros cultivos (Goudriaan y Van Laar, 1994; Spitters *et al.*, 1989). Esto muestra el potencial que este modelo tiene para estudiar el comportamiento del tomate de cáscara con mayor detalle en diferentes condiciones de manejo que se presentan en varios sistemas de cultivo de nuestro país. La biomasa de raíces no fue estudiada por la dificultad para determinarla. Es posible mejorar

la calidad de predicción del modelo SUCROS para crecimiento potencial, aplicado a un cultivo de tomate de cáscara mediante información obtenida de experimentos de campo más detallados, que permitan determinar con mayor precisión la información empírica que el modelo requiere, en especial la tasa de desarrollo y la distribución de la biomasa de frutos a lo largo del ciclo. Las simulaciones mostraron que esto es factible. Como SUCROS es un modelo que basa el crecimiento de los cultivos en los procesos de fotosíntesis y respiración, es claro que sí se puede determinar en forma experimental el valor de parámetros críticos de estos procesos, tales como el coeficiente de extinción de la radiación (KDF), que tiene influencia en la cantidad de radiación absorbida por el dosel, el coeficiente de eficiencia de uso de la radiación por una hoja individual (e), y la tasa máxima de fotosíntesis (A_{\max}), que afectan críticamente la tasa de asimilación de CO_2 . Puede esperarse que la calidad de predicción del modelo permita mejorar no sólo en el caso de la biomasa de los frutos, sino en cada uno de los órganos considerados y la biomasa total.

Es importante remarcar que el modelo estudiado sólo permite explicar el crecimiento potencial de un cultivo de tomate de cáscara, donde el crecimiento sólo está afectado por la cantidad de radiación y temperatura. Para estudiar el efecto en el crecimiento del cultivo de tomate de cáscara de otros factores limitantes como agua y nutrientes se requieren versiones del modelo más detalladas, tales como SUCROS2 (Van Laar *et al.*, 1997) y el modelo reciente GECROS (Yin y Van Laar, 2005).

CONCLUSIONES

El modelo teórico SUCROS para crecimiento potencial de cultivos fue usado para predecir el crecimiento de un cultivo de tomate de cáscara en Chapingo, Estado de México. Después de una estimación de cinco parámetros, mediante un algoritmo de mínimos cuadrados, el modelo fue capaz de predecir en forma aceptable el comportamiento del índice de área foliar, la biomasa

Cuadro 2. Valores de cinco parámetros del modelo SUCROS después de una calibración usando datos del experimento de crecimiento de tomate de cáscara sin acolchado.

VARIABLES AJUSTADAS	ϵ	A_{\max}	KDF	RGRL	SLA
Biomasa total	1.0648×10^{-5}	0.0111	0.4604	0.0249	0.0055
Tallos	3.2160×10^{-5}	0.0111	0.4736	0.0202	0.0013
Frutos	8.8866×10^{-6}	0.0104	0.4584	0.0285	0.0010
Hojas	4.5113×10^{-5}	0.0055	0.4433	0.0010	0.0131
Total+Tallos	9.8487×10^{-6}	0.0111	0.4616	0.0253	0.0065
Total+Frutos	8.8090×10^{-6}	0.0111	0.4593	0.0283	0.0029
Total+Hojas	1.0233×10^{-5}	0.0111	0.4606	0.0248	0.0063
Total+Tallos+Frutos	7.7145×10^{-6}	0.0111	0.4610	0.0292	0.0038
Total+Tallos+Hojas	1.0528×10^{-5}	0.0111	0.4605	0.0245	0.0065
Total+Tallos+Hojas+Frutos	9.7143×10^{-6}	0.0111	0.4593	0.0268	0.0041
Total+Tallos+Hojas+Frutos+IAF	5.5499×10^{-6}	0.0110	0.4644	0.0287	0.0136
Valor promedio	1.3603×10^{-5}	0.0105	0.4602	0.0238	0.0059
Desviación estándar	1.2997×10^{-5}	0.0017	0.0070	0.0080	0.0042

foliar, la biomasa de tallos, la biomasa de los frutos y también la biomasa de la parte aérea del cultivo.

NOMENCLATURA

Símbolo	Significado	Unidades			
A_{max}	Tasa de asimilación potencial de CO ₂ a saturación de luz para hojas individuales	g·m ⁻² ·s ⁻¹		T_{base}	Temperatura base para crecimiento foliar °C
ASRQ	Requerimiento de asimilados para la producción de biomasa estructural	g·g ⁻¹		T_{min}	Temperatura mínima (variable de entrada) °C d
$AsimTot$	Tasa de asimilación bruta de CO ₂	g·m ⁻² ·d ⁻¹		T_{max}	Temperatura máxima (variable de entrada) °C d
$Crec_{iaf}$	Función de crecimiento del índice de área foliar	m ² ·m ⁻² ·d ⁻¹		T_{ref}	Temperatura de referencia para la respiración de mantenimiento °C
$Crec_{foliar}$	Función de crecimiento foliar	g·m ⁻² ·d ⁻¹		x_{edes}	Estado de desarrollo adimensional
CrecTot	Tasa de crecimiento de la biomasa del cultivo	g·m ⁻² ·d ⁻¹		x_{iaf}	Índice de área foliar m ² ·m ⁻²
CFST	Fracción de masa de carbono en los tallos	g·g ⁻¹		x_{raiz}	Biomasa de las raíces g·m ⁻²
ΔT	Intervalo de tiempo de integración	d		x_{hv}	Biomasa de las hojas verdes g·m ⁻²
ϵ	Eficiencia inicial de uso de luz para hojas individuales	g·J ⁻¹		x_{hs}	Biomasa de las hojas secas g·m ⁻²
$f_{resp}(T)$	Función del efecto de la temperatura sobre la respiración de mantenimiento	adimensional		x_{tallo}	Biomasa de los tallos g·m ⁻²
$f(x_{edes}, T)$	Función empírica para la tasa de desarrollo	d ⁻¹		x_{fruto}	Biomasa de los frutos g·m ⁻²
$f_{resp}(x_{edes})$	Efecto del desarrollo sobre la respiración de mantenimiento	adimensional		y_h	Biomasa de las hojas g·m ⁻²
$fr_h(x_{edes})$	Fracción de biomasa para formación de hojas	adimensional		y_{bas}	Biomasa de la parte aérea de la planta (sin raíces) g·m ⁻²
$fr_b(x_{edes})$	Fracción de biomasa para formación de brotes	adimensional		y_b	Biomasa total de la planta g·m ⁻²
$f(d_{emerg})$	Parámetro para indicar la emergencia del cultivo	adimensional		y_{hi}	Índice de cosecha g·g ⁻¹
$fr_t(x_{edes})$	Fracción de biomasa para formación de tallos	adimensional			
$frf(x_{edes})$	Fracción de biomasa para formación de frutos	adimensional			
$f(x_{edes})$					
I	Radiación global (variable de entrada)	J·m ⁻² ·d ⁻¹			
KDF	Coefficiente de extinción de la radiación	m ² ·m ⁻²			
$Mort_{foliar}$	Tasa de mortalidad de las hojas	g·m ⁻² ·d ⁻¹			
$Mort_{iaf}$	Tasa de mortalidad área foliar	m ² ·m ⁻² ·d ⁻¹			
M_{hv}	Coefficiente de respiración de mantenimiento para las hojas	g·g ⁻¹ ·d ⁻¹			
M_{tallo}	Coefficiente de respiración de mantenimiento para tallos	g·g ⁻¹ ·d ⁻¹			
M_{raiz}	Coefficiente de respiración de mantenimiento para raíces	g·g ⁻¹ ·d ⁻¹			
M_{frutos}	Coefficiente de respiración de mantenimiento para órganos de almacenamiento	g·g ⁻¹ ·d ⁻¹			
PAR_{abs}	Radiación absorbida por el dosel	J·m ⁻² ·s ⁻¹			
Q10	Constante de la función de respiración de mantenimiento	adimensional			
RMant	Tasa de respiración de mantenimiento	g·m ⁻² ·d ⁻¹			
RGRL	Tasa de crecimiento relativa durante la fase de crecimiento exponencial del área foliar	°C ⁻¹ ·d ⁻¹			
RDR	Tasa de mortalidad relativa del área foliar	d ⁻¹			
RDRDV	Tasa de mortalidad relativa foliar debida al desarrollo	d ⁻¹			
RDRSH	Tasa de mortalidad foliar relativa debida al autosombreo de las hojas a una alto IAF	d ⁻¹			
SLA	Área foliar específica	m ² ·g ⁻¹			
Transl	Tasa de traslocación de biomasa de los tallos a los órganos de almacenamiento	g·m ⁻² ·d ⁻¹			

LITERATURA CITADA

- Bouman B. A. M.; Van Keulen H.; Van Laar H. H.; Rabbinge R. 1996. The 'School of de Wit' crop growth simulations models: a pedigree and historical overview. *Agricultural Systems* 52(2/3): 171-198.
- Calyecac C. H. G.; Cibrián T. J.; Soto H. M.; García V. R. 2007. Aislamiento e identificación de volátiles de *Physalis philadelphica* Lam. *Agrociencia* 41: 337-346.
- Castro B. R.; Sánchez G. P.; Peña L. A.; Alcántar G. G.; Baca C.; López R. R. M. 2000. Niveles críticos, de suficiencia y toxicidad de N-NO₃ en el extracto celular de pecíolos de tomate de cáscara. *Terra Latinoamericana* 18(2): 141-146.
- Goudriaan J.; Van Laar H. H. 1994. *Modelling Potential Crop Growth Processes. Textbook With Exercises.* Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. The Netherlands. 238 p.
- Heuvelink E. 1995. Dry matter production in a tomato crop: measurements and simulation. *Annals of Botany* 75: 369-379.
- Hunt R. 1978. *Plant growth analysis, Studies in Biology* Núm. 96, Edward Arnold, London. 67 p.
- Hunt R. 1982. *Plant growth curves. The functional approach to plant growth analysis.* Edward Arnold, London. 260 p.
- López C. I. L.; Ramírez A. A.; Rojano A. A. 2005. Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Revista Chapingo Serie Horticultura* Vol. 11(2): 257-267.
- López L. R.; Arteaga R. R.; Vázquez P. M. A.; López C. I. L.; Sánchez C. I. 2009. Producción de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) basado en lámina de riego y acolchado plástico. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 15(1): 83-89.
- Ramos L. C.; Alcantar G. G.; Galvis E. A.; Peña L. A.; Martínez G. A. 2002. Eficiencia de uso del nitrógeno en tomate de cáscara en fertirriego. *Terra Latinoamericana* 20(4): 465-469.
- Spitters C. J. T.; Van Keulen H.; Van Kraalingen D. W. G. 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. *In: Rabbinge R.; Ward S. A.; Van Laar H. H. (eds.), Simulation and Systems Management in Crop Protection, PUDOC, Wageningen, 1989.*
- The MathWorks Inc. 1984-2008. *Matlab Getting Started Guide.* Natick, MA, USA. 256 p.
- Van Ittersum M. K.; Leffelaar P. A.; Van Keulen H.; Kropff M. J.; Bastiaans L.; Goudriaan 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 Laar H. H.; Goudriaan J.; Van Keulen H. 1997. SUCROS97: Simulation of Crop Growth for Potential and Water-Limited Production Situations. *Quantitative Approaches in System Analysis Vol 14*. AB-DLO. Wageningen. The Netherlands. 73 p.
- Wolf J. 2002. Comparison of two potato simulation models under climate change I. Model calibration and sensitivity analyses. *Climate Research* 21: 173-186.
- Yin X.; Van Laar H. H. 2005. *Crop Systems Dynamics. An Ecophysiological Simulation Model for Genotype-By-Environment Interactions*. Wageningen Academic Publishers. Wageningen. The Netherlands. 155 p.