

SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE PIMIENTO (*Capsicum annum L.*) BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO*

GROWTH AND DEVELOPMENT SIMULATION OF PEPPER (*Capsicum Annum L.*) UNDER GREENHOUSE CONDITIONS

Fabiola Hernández-Hernández¹, Irineo Lorenzo López Cruz², Ramón Gerardo Guevara-González¹, Enrique Rico-García¹, Virginia Rosalía Ocampo-Velásquez¹, Gilberto Herrera-Ruiz³, Mario Martín Gonzalez-Chavira⁴ e Irineo Torres-Pacheco^{1§}

¹Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. Cerro de las campanas, Querétaro, México. Tel. 01 442 1921200. Ext. 6096 y 9093. (fafhh.9@gmail.com), (ramon.guevara@uaq.mx), (ricoq@uaq.mx), (rosov05@yahoo.com.mx). ²Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5. Chapingo, México. Tel. 01 595 9521551. (ilopez@correo.chapingo.mx). ³Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. Cerro de las campanas, Querétaro. México. Tel. 01 442 1921200. Ext. 6008. (gherrera@uaq.mx). ⁴Campo Experimental Bajío. INIFAP. Carretera Celaya-San Miguel Allende, km 6.5. Celaya, Guanajuato, México. Tel. 01 461 15323. Ext. 127. (gonzalez.mario@inifap.gob.mx). [§]Autor para correspondencia: irineo.torres@uaq.mx.

RESUMEN

La producción hortícola en invernadero demanda que las prácticas tengan el efecto esperado, para ello es necesario que se pueda determinar con precisión las desviaciones, que ocurran durante el crecimiento y desarrollo de los cultivos. La modelación permite tener de forma cuantitativa la interacción de procesos simultáneos en la planta y en consecuencia se pueden anticipar los cambios de las variables de estado en los cultivos. Este trabajo tiene el objetivo de contribuir la predicción del crecimiento y desarrollo del pimiento mediante el uso de la simulación. Justamente se hace considerando las condiciones de producción particulares de Querétaro, México, durante el periodo 2008-2009. Se aborda la implementación en pimiento de un modelo de crecimiento y desarrollo, creado originalmente para el cultivo de jitomate. El modelo utilizado es el TOMGRO (TOMato GROwth model) simplificado, el cual predice el crecimiento potencial del cultivo, tomando en cuenta la radiación solar que incide en fotosíntesis (PAR), temperatura y cantidad de dióxido de carbono en el sitio experimental. Se utilizaron las variedades Triple Star y Triple 4 de pimiento. Se realizó el ajuste de parámetros del modelo obteniendo resultados adecuados en la predicción del

ABSTRACT

Greenhouse horticultural production demands practices to have the desired effect, this requires an accurately determination of deviations that occur during growth and crops development. Modeling allows having in a quantitative way the plant simultaneous processes and therefore changes in crops state variables can be anticipated. This work aims to contribute to pepper growth and development prediction using simulation. Considering the specific production conditions of Querétaro, Mexico; during 2008-2009. It discusses the implementation in pepper of a growth and development model, originally developed for tomato crop. The model used is TOMGRO (TOMato GROwth Model) simplified, which predicts potential crop growth by solar radiation in photosynthesis (PAR), temperature and carbon dioxide amount at the experimental site. Pepper varieties used were Triple Star and Triple 4. Model parameters adjustment was made by obtaining adequate results in crop development prediction; therefore, generated model adjusted for pepper can be used in intermediate technology greenhouses in Mexico.

* Recibido: septiembre de 2010
Aceptado: mayo de 2011

desarrollo del cultivo; por lo tanto, el modelo ajustado para pimiento que se generó puede ser usado en invernaderos de tecnología intermedia en México.

Palabras clave: ajuste de parámetros, modelación de cultivos, modelo TOMGRO simplificado.

INTRODUCCIÓN

La modelación del crecimiento de las plantas se ha convertido en una actividad relevante de investigación en la agricultura. La disponibilidad de recursos computacionales y el intercambio de experiencias entre matemáticos, expertos en computación y biólogos ha contribuido de manera importante (Fourcaud *et al.*, 2008).

La modelación de cultivos permite tener una forma cuantitativa de la interacción de procesos simultáneos, en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (López *et al.*, 2006). Actualmente existen varios modelos cuyo grado de complejidad depende del tipo de aplicación, los modelos de crecimiento empíricos de los cultivos que se aplican sin considerar procesos fisiológicos funcionan de manera eficiente para predecir el rendimiento o algunos rasgos del desarrollo, pero requieren ser calibrados para una especie en particular y para las condiciones del lugar específico (Lacointe, 2000). Se han desarrollado en la escuela de 'De Wit', desde los 60's a la fecha modelos como SUCROS (Simple and Universal CROp Growth Simulator) y LINTUL (Light INTerception and UtiLization), que se pueden adaptar a cualquier cultivo anual (Bouman *et al.*, 1996; Heuvelink, 1999).

También se han desarrollado modelos para pepino, lechuga, pimiento y jitomate (Wubs *et al.*, 2009); para éste último se pueden encontrar varios trabajos como el modelo TOMGRO (TOMato GROwth model) en sus diferentes versiones, donde la versión original contiene 69 variables de estado, el cual predice desarrollo y producción (Jones *et al.*, 1991). Una versión simplificada de éste modelo contiene 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 (Jones *et al.*, 1999).

El modelo TOMGRO reducido considera los mismos procesos de fotosíntesis, respiración y desarrollo del modelo original (Jones *et al.*, 1999). Dado que en México se ha trabajado poco en la modelación de cultivos y en

Key words: crop modeling, parameterization, TOMGRO simplified model.

INTRODUCTION

Modeling of plant growth has become an important research activity in agriculture. Computing resources availability and sharing experiences among mathematicians, computer scientists and biologists have contributed significantly (Fourcaud *et al.*, 2008).

Crop modeling, provides a quantitative way of simultaneous interaction in growth and crop development (López *et al.*, 2006). There are currently several models whose complexity depends on application type, crop growth empirical models that apply regardless of physiological processes, work efficiently for performance predicting or some development features, but they need to be calibrated for a particular species and specific site conditions (Lacointe, 2000). Different models have been developed at 'De Wit' school since the 60's, models as SUCROS (Simple and Universal CROp Growth Simulator) and LINTUL (Light INTerception and UtiLization) which can be adapted to any annual crop (Bouman *et al.*, 1996; Heuvelink, 1999).

Models have also been developed for crops such as cucumber, lettuce, pepper and tomato (Wubs *et al.*, 2009), there are several jobs for tomato as model TOMGRO (TOMato GROwth model) in different versions, and the original contains 69 state variables that predict development and production (Jones *et al.*, 1991). A simplified version of this model contains only five state variables: number of nodes on the main stem, leaf area index, total plant weight, fruit weight and weight of ripe fruit (Jones *et al.*, 1999).

TOMGRO reduced model, considers the same photosynthesis, respiration and development processes of the original model (Jones *et al.*, 1999). In Mexico there has been few work on crop modeling and especially in peppers, is necessary to establish reference models for this crop to estimate favorable climate conditions for better production. The aim of this study was to implement TOMGRO to pepper under greenhouse conditions to estimate the right conditions and predictions of growth and crop development.

especial en Chile pimiento, es necesario establecer modelos de referencia para este cultivo que permitan estimar las condiciones climáticas favorables para una mejor producción. El objetivo de este trabajo fue implementar el TOMGRO al pimiento bajo condiciones de invernadero, para estimar las condiciones adecuadas y realizar predicciones de crecimiento y desarrollo del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se desarrolló durante 2008-2009, en el Campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro, el Marqués, Querétaro. El municipio del Marqués se localiza al noroeste del estado de Querétaro al norte a 20° 58', al sur 20° 31' de latitud norte; al este 100° 09' y al oeste 100° 24' de longitud oeste. El cultivo se estableció en un invernadero de 12 m de largo por 9 m de ancho.

Se utilizaron las variedades Triple Star y Triple 4 de pimiento, la densidad fue de 1.9 plantas m⁻², con un arreglo de 6 camas con 34 plantas; a una distancia de 30 cm entre plantas y 100 cm entre camas. La cubierta del suelo fue blanca y en ocasiones se utilizó el encalado de los plásticos para disminuir la radiación. Las variables que se midieron fueron: el número de nodos en los tres tallos principales a los que se dejó la planta, área foliar, peso seco total, peso seco de todos los frutos y el peso seco de frutos maduros. Para obtener los datos, se cosecharon siete plantas por cada variedad, cada 10 días durante 60 días después del trasplante (DDT), los datos restantes se realizaron en periodos de 15 a 20 días. Los nodos se contaron en el tallo principal y posteriormente en tres tallos a los que se dejó la planta.

Para el peso seco se separaron las partes de tallo, raíz, hojas y frutos y se pesaron en fresco, posteriormente se colocaron en un horno a temperatura de 95 °C por 72 h para su deshidratación y al final se pesaron. La suma de los pesos excepto la raíz se consideraron como peso seco total. En el caso del área foliar se fotografiaron las áreas y posteriormente se pasaron al programa Matlab, y utilizando una rutina para la diferencia del verde, se tomó como unidad el píxel calculando el área en píxeles y posteriormente se hizo el cambio a la escala real.

Se registró la temperatura, CO₂ y radiación solar global, cada 5 min. Para registrar la temperatura se usó un Data Logger 450 modelo 400 con 4 canales, en dos de ellos se

MATERIALS AND METHODS

This work was developed during 2008-2009, at Campus Amazcala of Querétaro the Marqués Autonomous University, Querétaro. Marqués is located at Querétaro northwest, at 20° 58' north, 20° 31' south of north latitude, 100° 09' east and 100° 24' west of west longitude. The crop was established in a greenhouse of 12 m long by 9 m wide.

Pepper varieties used were Triple Star and Triple 4, the density was 1.9 plants m⁻², with 6 beds with 34 plants, at a distance of 30 cm between plants and 100 cm between beds. Ground cover was white and sometimes plastics were used to reduce radiation. Measured variables were: number of nodes in the three main stems of the plant, leaf area, total dry weight, dry weight of all fruits and dry weight of ripe fruits. To obtain data, seven plants were harvested for each variety, every 10 days for 60 days after transplanting (DAT), remaining data were performed in periods of 15 to 20 days. Nodes were counted on the main stem and then in three stalks left on the plant.

To obtain dry weight, stem parts, root, leaves and fruits were separated and weighed fresh, then placed in an oven at 95 °C for 72 h for dehydration and finally weighed. Weights total except root's weight were considered as dry weight. Leaf area were photographed and transferred to Matlab software, using a difference in green routine, pixel was taken as unit, calculating area in pixels and then changed to real scale.

Temperature, CO₂ and global solar radiation were recorded every 5 min. For temperature recording a Data Logger 450 model 400 with 4 channels was used, two of them keep the temperature and relative humidity and the other two are connected the CO₂ sensor and radiation. Silicon Pyranometer was used for radiation and CO₂ monitor was used to capture data from air CO₂. To simulate growth and crop development model used was TOMGRO reduced, some internal functions of model state variables governing equations were changed (Jones, 1999), for Gaussian functions (Hernández, 2009).

Model parameters were fitted with each variety recorded data, using genetic algorithms (Reeves and Rowe, 2004). Due to the similarity of estimated parameters for each variety, an average was made in order to obtain a single value and simulate with it both varieties. The

guarda la temperatura y la humedad relativa y los otros dos se les conectó el sensor de CO₂ y radiación. Para la radiación se utilizó el Silicon Pyranometer y el CO₂ monitor se uso para capturar los datos del CO₂ del aire. Para simular el crecimiento y desarrollo del cultivo se utilizó el modelo TOMGRO reducido, en el cual se modificaron algunas funciones internas de las ecuaciones que rigen las variables de estado del modelo (Jones, 1999), por funciones Gaussianas, (Hernández, 2009).

Los parámetros del modelo fueron ajustados con los datos registrados para cada variedad utilizando algoritmos genéticos (Reeves y Rowe, 2004). Dada la similitud de los valores estimados de los parámetros en cada variedad, se realizó un promedio para obtener un sólo valor y simular con él ambas variedades. El ambiente de programación para la simulación y ajuste de parámetros fue Matlab (Hendrickx y Martins, 2008) versión 6.5.

RESULTADOS

Número de nodos

El TOMGRO establece que la aparición de nodos en jitomate depende solo de la temperatura (Jones *et al.*, 1999; Ramírez, 2005). Pero en este trabajo con pimiento, el desarrollo de nodos se detuvo en la etapa de fructificación, por lo que se realizó un ajuste de reducción en el modelo quedando la ecuación de la manera siguiente:

$$\frac{dX_N}{dt} = N_m \cdot N_r \cdot f(T_d)$$

Donde: N_r =factor de reducción mencionado anteriormente, el cual empieza a afectar a 52 días después del trasplante. Los resultados sugieren que la aparición de nodos es -0.5 nodos por día (N_m), en las dos variedades objeto de este estudio (Cuadro 1).

Por otra parte la función $f(T_d)$ se modificó quedando como sigue:

$$f(T_d) = \exp(-((T_d - \mu) / \sigma)^2)$$

Utilizando esta función se estima que la temperatura adecuada para el desarrollo de nodos en pimiento es 23-23.5 °C, la cual se encuentra comprendida dentro del rango

programming environment for simulation and parameter setting was Matlab (Hendrickx and Martins, 2008) version 6.5.

RESULTS

Number of nodes

TOMGRO sets that nodes appearance in tomato, depends only on temperature (Jones *et al.* 1999; Ramírez, 2005). But in this work with peppers, nodes development stopped at fruiting stage, so a reduction adjustment was made to the model, leaving the equation as follows:

$$\frac{dX_N}{dt} = N_m \cdot N_r \cdot f(T_d)$$

Where: N_r =reduction factor mentioned above, which begins to affect 52 days after transplantation. Results suggest that nodes appearance is -0.5 nodes per day (N_m), in the two varieties of this study (Table 1).

Cuadro 1. Valores estimados para el número de nodos en variedades de pimiento.

Table 1. Estimated values for the number of the nodes in pepper varieties.

Característica	Triple Star	Triple 4
N_m (nodo d ⁻¹)	0.46	0.43
N_r	0.6	0.7
Temperatura óptima	23.5 °C	23 °C

Moreover, $f(T_d)$ function was modified as follows:

$$f(T_d) = \exp(-((T_d - \mu) / \sigma)^2)$$

Using this function, it is estimated that appropriate temperature for nodes development in pepper is 23-23.5 °C, which is within the range of 20-25 °C, previously mentioned as favorable (Rico, 1983; Jiménez-Vázquez, 2006). Applying the respective functions, it is detected that temperature range is adequate for pepper development (Figure 1) and is lower than in tomato case (Ramírez, 2005). Discrepancy is partially influenced by the fact that tomato model function does not consider the rate reduction factor of nodes appearance at fruiting beginning (Jones *et al.*, 1991; Jones *et al.*, 1999). To determinate goodness of fit between

20-25°C mencionado previamente, como favorable (Rico, 1983; Jiménez-Vázquez, 2006). Aplicando las funciones respectivas se detecta que el rango de temperatura para el desarrollo de pimiento es adecuado (Figura 1), es menor que el caso de jitomate (Ramírez, 2005). La diferencia observada es influida parcialmente, por el hecho de que la función del modelo de jitomate, no considera el factor de reducción de la velocidad de aparición de nodos al inicio de la fructificación (Jones *et al.*, 1991; Jones *et al.*, 1999). Para determinar la bondad de ajuste entre los datos observados y los estimados, se calculó el coeficiente de correlación (Cohen y Cohen, 1983), encontrándose que en el caso de la variedad de pimiento Triple 4, $r^2= 0.92$ y con Triple Star, $r^2= 0.9$.

Índice de área foliar

El índice de área foliar (IAF) es una función que depende del número de nodos en la planta (Jones *et al.*, 1999), entonces si se toman los valores de los parámetros propuestos para jitomate, el modelo sobreestima el índice de área foliar en pimiento a partir del día número 60 DDT (Figura 2).

observed and estimated data, correlation coefficient was calculated (Cohen and Cohen, 1983), finding that in pepper variety Triple 4, $r^2= 0.92$ and Triple Star, $r^2= 0.9$.

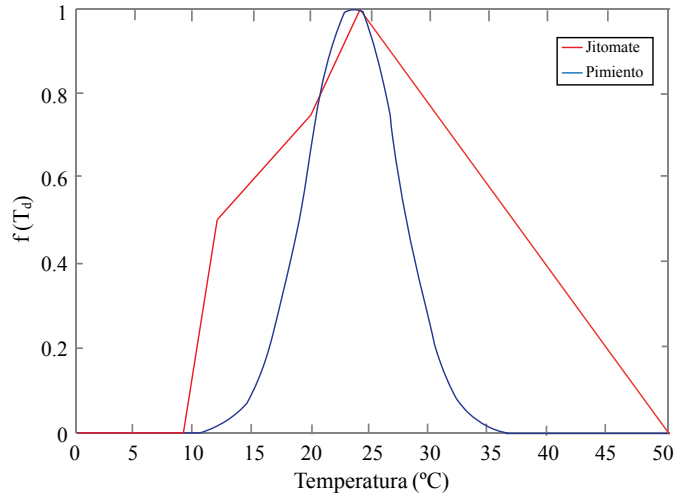


Figura 1. Comparación de la función $f(T_d)$ para jitomate y la generada para pimiento (promedio de las dos variedades).

Figure 1. Comparison of tomato $f(T_d)$ function and generated for pepper function (two varieties average).

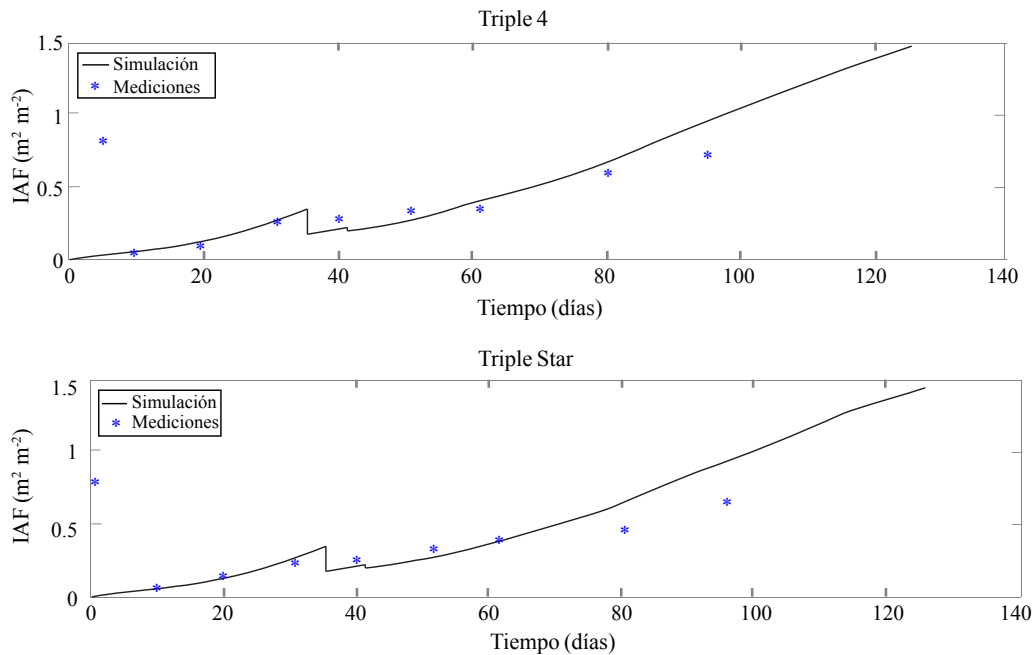


Figura 2. Simulación del IAF para las variedades de pimiento Triple 4 y Triple Star con valores estimados de los parámetros para jitomate.

Figure 2. LAI simulation for Triple 4 and Triple Star pepper varieties with parameters estimated values for tomato.

La estimación de los parámetros específicos para las dos variedades de pimiento y la conjunta (Cuadro 2), el coeficiente δ ($\text{m}^2 \text{nodo}^{-1}$), que representa la máxima expansión de área foliar por nodo, coincide en las dos variedades de pimiento; además, es igual al que se ha reportado previamente para jitomate (Jones *et al.*, 1999). El valor que se obtuvo en el ajuste, significa que la máxima expansión de área foliar por nodo y por planta es de 158 cm^2 . En lo que concierne a los valores de β y N_b , existen diferencias respecto a los valores que se han reportado en jitomate (Jones *et al.*, 1999; Ramírez, 2005).

Cuadro 2. Valores estimados que se obtuvieron en el ajuste del número de nodos para las dos variedades de pimiento.
Table 2. Estimated values obtained in nodes number adjustment for two pepper varieties.

Parámetros	Triple Star	Triple 4	Valor propuesto para ambas variedades
δ	0.03	0.03	0.03
β	0.32	0.6	0.45
N_b	13	10.3	11.5
A_r	0.59	0.56	0.6

El último parámetro en cuanto al índice foliar que se estimó fue A_r , el cual genera una reducción en el desarrollo de área foliar a partir del inicio de la fructificación, pero se obtuvo $R^2 = 0.9$ entre los valores esperados y los estimados con el modelo, en este caso coincide con la reducción aplicada en TOMGRO (Jones *et al.*, 1991).

Biomasa

Para el caso de la biomasa total, de frutos y de frutos maduros se estimaron algunos parámetros, incluyendo la modificación de algunas funciones empíricas que propuso Ramírez (2005). De igual manera que en nodos y en área foliar, se propone el valor de los parámetros de cada variedad y los que sirven a las dos variedades utilizadas (Cuadro 3). Considerando que en la fotosíntesis bruta se tiene un factor de reducción en temperaturas subóptimas con la función $f_{\text{forT}}(T)$, se propuso a $f_{\text{forT}}(T) = \exp(-((T - T_m)/T_s)^2)$. La gráfica de esta función comparada con la obtenida para jitomate (Jones *et al.*, 1991; Ramírez, 2005), es diferente (Figura 3); para el caso del pimiento se observa que la temperatura adecuada para que ocurra la fotosíntesis es alrededor de 29°C .

Cuadro 3. Valores estimados de la función $f_{\text{forT}}(T)$.
Table 3. Estimated values of $f_{\text{forT}}(T)$ function.

Parámetros	Triple Star	Triple 4	Valor propuesto
T_m $^\circ\text{C}$	29.9	29.4	29
T_s $^\circ\text{C}$	9.8	9.8	9.8

Leaf area index

Leaf area index (LAI) is a function that depends on the number of the nodes in the plant (Jones *et al.*, 1999), then if tomato parameters proposed values were used, the model would overestimate pepper leaf area index from day 60 DAT (Figure 2).

Estimation of specific parameters for each pepper varieties and together (Table 2), δ ($\text{m}^2 \text{nodo}^{-1}$) coefficient, which represents maximum leaf area expansion per node, is

equal in the two pepper varieties, is also equal to that previously reported for tomato (Jones *et al.*, 1999). Value obtained in adjustment means that the maximum leaf area expansion per node and per plant is 158 cm^2 . Regard to β and N_b values, there are values differences with respect to those reported for tomato (Jones *et al.*, 1999; Ramírez, 2005).

The last estimated parameter about leaf index was A_r , which generates a reduction in leaf area development from fruiting beginning, $R^2 = 0.9$ was obtained between expected values and those estimated with model, in this case they coincided with applied reduction in TOMGRO (Jones *et al.*, 1991).

Biomass

In the case of total biomass of fruits and ripe fruits, some parameters were estimated, including the modification of some empirical functions proposed by Ramírez (2005). Just as in nodes and leaf area, we propose parameter values for each variety and those who serve for two varieties used (Table 3). Whereas in gross photosynthesis there is a reduction factor in suboptimal temperatures with $f_{\text{forT}}(T)$ function, $f_{\text{forT}}(T) = \exp(-((T - T_m)/T_s)^2)$ was proposed. This function graph compared with that obtained for tomato (Jones *et al.* 1991; Ramírez, 2005) is different (Figure 3), for pepper is noted that appropriate temperature for photosynthesis to occur is about 29°C .

Sin embargo, es necesario ser cauto con ésta propuesta, ya que en otros reportes se ha observado que aumentar la temperatura (25 °C) se incrementa la fotosíntesis bruta, pero al mismo tiempo aumenta la respiración, de modo que la fotosíntesis neta es similar a la que se tiene con temperaturas menores (18 °C) (Marcelis *et al.*, 2006).

La variable crecimiento al igual que en los casos anteriores depende de la cantidad de nodos. Por lo que para estimar el crecimiento diario se propone la función:

$$f_r(X_N) = h \exp(-(X_N / X_S)^2) + a$$

En los valores estimados para las constantes de ésta función, se notan diferencias importantes entre ambas variedades de pimiento, por lo que en cuanto esta variable se requiere considerarlos por separado para tener mayor precisión (Cuadro 4).

Cuadro 4. Valores estimados de los parámetros de la función $f_r(X_N)$.

Table 4. Estimated values of $f_r(X_N)$ function parameters.

Parámetros	Triple Star	Triple 4	Valor propuesto
h	0.48	0.3	0.3
X_S	10.2	8.5	10
a	0.004	0.05	0.03

Cuando simulamos la biomasa total con los valores estimados para los parámetros en jitomate por Jones *et al.* (1991; 1999), el modelo subestima los datos reales incluso al final del experimento en la cosecha de frutos, se observan valores negativos de la biomasa los cuales son imposibles de obtener. Esto se debe que al utilizar los parámetros obtenidos para jitomate, la fotosíntesis bruta es menor a la que se determina cuando se usan los valores generados en pimiento. Pero con la respiración ocurre lo contrario; es decir, con los valores de jitomate se espera más respiración que con pimiento.

La función de respiración supone una disminución a temperaturas debajo de 20 °C y aumenta cuando se tienen valores mayores y como las temperaturas presentes en el experimento de pimiento son más altas en promedio, que donde se experimentó con jitomate, ocasiona que la respiración sea afectada, ya que esta parte de la función respiración no se modificó y se ajustó el coeficiente de respiración de mantenimiento, obteniendo un valor

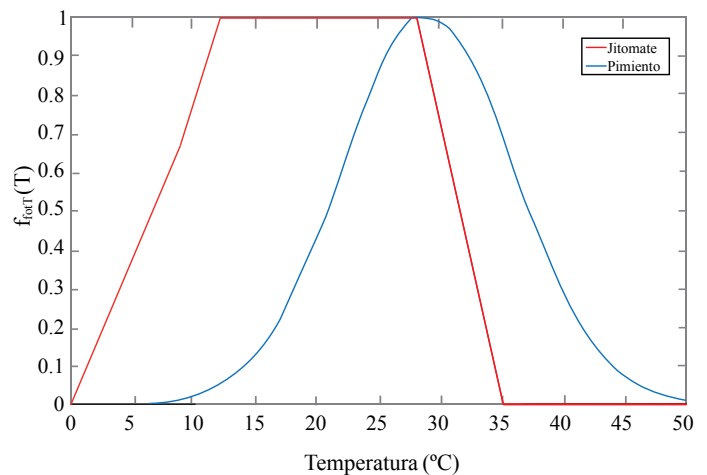


Figura 3. Efecto del factor de reducción en la simulación de fotosíntesis bruta en jitomate y pimiento utilizando el promedio de los valores de las dos variedades.

Figure 3. Effect of reduction factor in gross photosynthesis simulation in tomato and pepper, using the two varieties average values.

However, it is necessary to be cautious with this proposal, as other reports have shown that increasing temperature (25 °C), increases gross photosynthesis, but also enhances breathing, so net photosynthesis is similar to the one obtained with lower temperatures (18 °C) (Marcelis *et al.*, 2006).

Growth variable, as in previous cases, depends on nodes number. So, to estimate daily growth we propose next function:

$$f_r(X_N) = h \exp(-(X_N / X_S)^2) + a$$

In estimated values for this function constant, important differences between two pepper varieties are noted, so this variable requires to splitting them up for greater accuracy (Table 4).

When we simulated the total biomass with estimated values for tomato parameters by Jones *et al.* (1991; 1999), model underestimates actual data, even at the end of the experiment at fruit harvest, there are biomass negative values which are impossible to obtain. This happens because when using obtained parameters for tomato, gross photosynthesis is lower than that determined when using values generated in pepper. The opposite happens with respiration; with tomato values we expected more respiration than with pepper values.

estimado menor en pimiento que en jitomate. Por ello se tuvo que ajustar ésta variable al comportamiento observado en pimiento, acorde con las funciones propuestas anteriormente y algunos parámetros se tuvieron que estimar (Cuadro 5).

El coeficiente de extinción de la radiación K pudo no haberse estimado y haber tomado el valor teórico de 0.7 propuesto por Goudriaan y Van Laar (1994), que sirve para cualquier cultivo o bien utilizar algún valor (0.42 a 0.82 y 0.72), estimado para pimiento previamente (Gijzen *et al.*, 1990; Nederhoff y Verter, 1994). Sin embargo, se optó por estimarlo en este caso particular para efectos de precisión local, obteniendo valores entre 0.54 y 0.81 (Cuadro 6). Con el valor estimado del coeficiente que representa la proporción de biomasa y fotosíntatos disponibles para el crecimiento E, se puede decir que 25% de fotosíntatos se utilizan para el mantenimiento de la planta y el otro 75% para su crecimiento. En jitomate, Jones *et al.* (1991) propuso un valor de 0.7; es decir, 70% de fotosíntatos se utiliza para el crecimiento.

Por otro lado al igual que con el coeficiente de extinción, en el caso de la radiación, Q10 tiene un valor teórico igual a 2 y Marcelis *et al.* (2006) lo usa para la modelación de pimiento, pero dicho valor puede variar de 1 a 3 (Goudriaan y Van Laar, 1994), por lo que se decidió hacer la estimación encontrando un valor de 1.4 a 1.66.

El coeficiente de transmisión de luz por hojas C_m no se estimó, ya que varios autores han coincidido en el mismo valor ya sea para aplicar en pimiento o en otros cultivos (Jones *et al.*, 1991; Goudriaan y Van Laar, 1994; Nederhoff y Verter, 1994). Con estos datos se puede tener un ajuste adecuado de las dos variables con un coeficiente de determinación R^2 cercano a 0.9, entre los datos determinados por el modelo y los observados. Las discontinuidades en las gráficas son debidas a las podas y a las cosechas realizadas (Figura 4).

Biomasa total de frutos

La función que representa la partición de biomasa para los frutos, depende de la temperatura promedio diaria se modificó, quedando de la siguiente forma:

$$f_f(T_d) = \exp(-((T_d - T_{dm}) / T_{ds})^2)$$

Respiration function, decreases at temperatures below 20 °C and increases at higher values. Temperatures in pepper experiment are on average, higher than those in tomato experiment, affecting breathing, since this respiration function part was not modified and the maintenance respiration coefficient was adjusted, obtaining an estimated value lower in pepper than in tomato. Therefore, it was necessary to adjust this variable to the behavior observed in pepper, according to previously proposed functions and some parameters had to be estimated (Table 5).

Cuadro 5. Parámetros estimados en la ecuación que modela la biomasa total y valores propuestos para ambas variedades.

Table 5. Estimated parameters in equation that models total biomass and proposed values for both varieties.

Parámetros	Triple Star	Triple 4	Valor propuesto
E(d ⁻¹)	0.79	0.7	0.75
Q10	1.4	1.66	1.6
K	0.54	0.81	0.66
($\mu\text{mol m}^{-2}\text{S}^{-1}$)	0.45	0.66	0.62
($\mu\text{mol } \mu\text{mol}^{-1}$)	0.18	0.2	0.19
$r_m(\text{gg}^{-1}\text{d}^{-1})$	0.001	0.002	0.002

Extinction coefficient of K radiation could have not been estimated and taking theoretical value of 0.7 proposed by Goudriaan and Van Laar (1994) instead, used for any crop or use any value (0.42 to 0.82 and 0.72), previously estimated for pepper (Gijzen *et al.* 1990; Nederhoff and Verter, 1994). However, we decided to estimate it for local accuracy purposes, obtaining values between 0.54 and 0.81 (Table 6). With coefficient estimated value that represents biomass proportion and available photosynthates for E growth, we can say that 25% of photosynthates are used for plant maintenance and the other 75% for growth. In tomato, Jones *et al.* (1991) proposed values of 0.7, ie, 70% of photosynthates are used for growth.

Cuadro 6. Parámetros estimados para la función que representa la partición de biomasa para los frutos en cada variedad.

Table 6. Estimated parameters for function that represents biomass partition for each variety fruits.

Parámetros	Triple Star	Triple 4	Valor propuesto
T_{dm} °C	22.9	22	23
T_{ds}	2.3	2.4	2.3

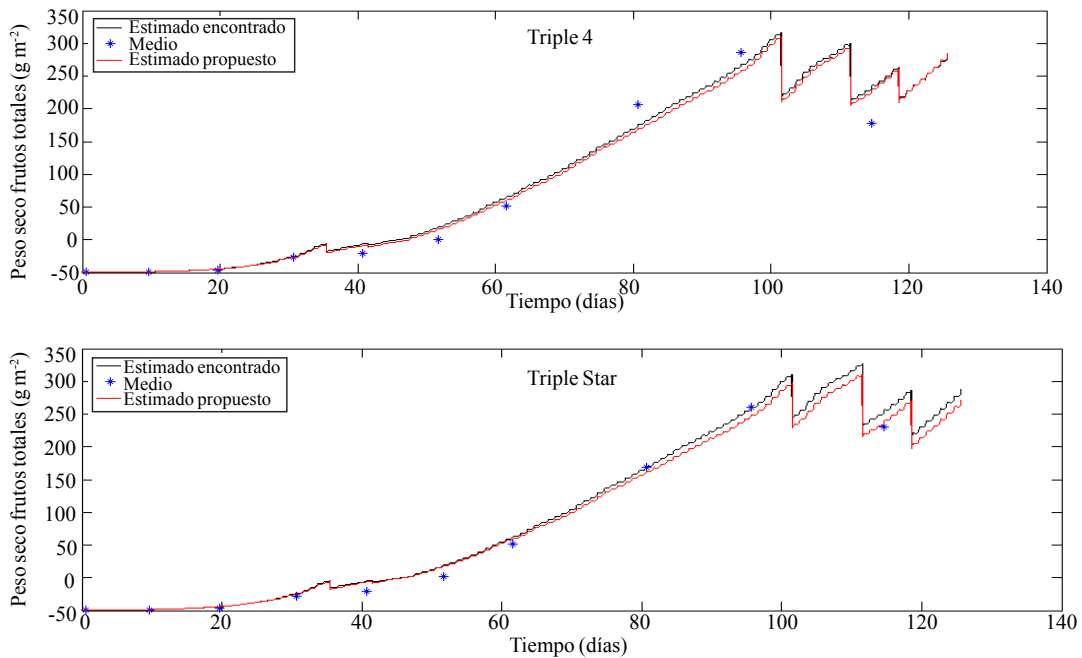


Figura 4. Predicción de la biomasa total.
Figure 4. Total biomass prediction.

Como se puede observar en la Figura 5, la temperatura más adecuada que se estimó para ésta función, coincidió con la que se determinó para el desarrollo de nodos, lo cual es razonable ya que la cantidad de nodos determina la cantidad de frutos que pueden desarrollarse.

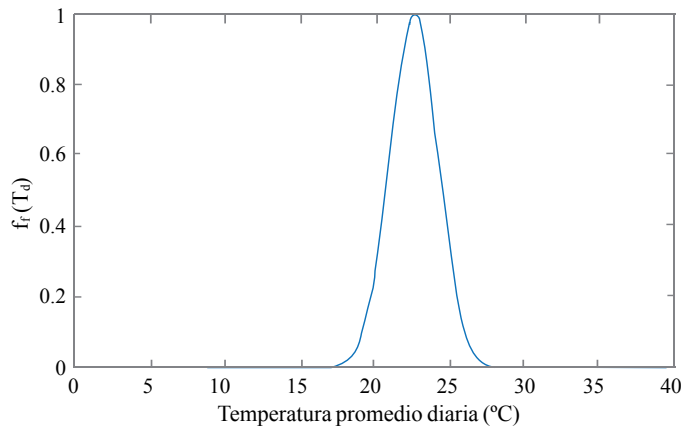


Figura 5. Efecto de la temperatura promedio diaria en la partición de biomasa para los frutos en pimiento.
Figure 5. Effect of average daily temperature in biomass partitioning for pepper fruits.

En la función $f(T_{dia})$ sólo se estimó la temperatura crítica a la que inicia el aborto de frutos, para la variedad Triple Star se estimó en 36 °C mientras que para Triple 4 en

Moreover, as with the extinction coefficient in the case of radiation, Q_{10} has a theoretical value equal to 2 and Marcelis *et al.* (2006) use it for pepper modeling, this value can oscillate from 1 to 3 (Goudriaan and Van Laar, 1994), so we decided to make an estimation, finding a value from 1.4 to 1.66.

Transmission of light by leaves coefficient C_m was not estimated as several authors have agreed to the same value, either to apply in pepper or other crops (Jones *et al.* 1991; Goudriaan and Van Laar, 1994; Nederhoff and Verter, 1994). With these data we can have a proper adjustment of two variables with a determination coefficient R^2 close to 0.9, between data determined by model and those observed. Graphs discontinuities are due to pruning and harvesting (Figure 4).

Total fruit biomass

Function that represents fruits biomass partitioning, depends on daily average temperature. It was modified as follows:

$$f_r(T_d) = \exp(-((T_d - T_{dm}) / T_{ds})^2)$$

As shown in Figure 5, the most suitable temperature estimated for this function, coincided with that determined for nodes development, which is reasonable since the number of the nodes determines the amount of fruit that can be developed.

aproximadamente 34 °C. Existe gran diferencia entre estos valores y la temperatura crítica estimada en jitomate que oscila entre 24.4-26 °C (Jones *et al.*, 1999; Ramírez, 2005). Las diferencias que se pueden observar si se corre el modelo con los datos para jitomate, pueden ser consecuencia del hecho que no se está trabajando con la misma especie, a características diferenciales de las variedades de pimiento; o bien, que los experimentos en jitomate se llevaron a cabo en condiciones climáticas diferentes a las que se tienen en México.

La estimación de los parámetros restantes que intervienen en la tasa de cambio de la biomasa de frutos totales se observan en el Cuadro 7. La estimación α_f para la variedad Triple Star se encuentra dentro del intervalo (0.8 a 0.95) reportado para jitomate por (Jones *et al.*, 1999; Ramírez, 2005). Sin embargo, en el caso de la variedad Triple 4 se observa una diferencia relevante.

Esto sugiere revisar a detalle este factor ya que un valor muy bajo de α_f se reflejaría en un retraso del desarrollo de frutos nuevos, aunque al realizar la simulación con el valor propuesto de 0.7, el comportamiento de la simulación al inicio de la fructificación se ajusta mejor que con el valor estimado (Figura 6). Por su parte la estimación de v difiere de la propuesta (0.2) en reportes previos (Jones *et al.*, 1999; Ramírez, 2005).

In $f(T_{\text{día}})$ function, only critical temperature at which fruits abortion begins was estimated, for Triple Star 36 °C was estimated t while for Triple 4 approximately 34 °C. There is great difference between these values and estimated critical temperature for tomato from 24.4 to 26 °C (Jones *et al.* 1999; Ramírez, 2005). Differences observed if we run the model with data for tomato may result from the fact that you are not working with the same species, or differential characteristics of pepper varieties, or that tomato experiments were carried out under different climatic conditions than those we have in Mexico.

Estimation of remaining parameters involved in exchange rate of total fruit biomass, are seen in Table 7. The α_f estimation for Triple Star variety is in the range (0.8 to 0.95) reported for tomato by (Jones *et al.* 1999; Ramírez, 2005). However, Triple 4 variety shows a significant difference.

Cuadro 7. Valores de los parámetros usados en la ecuación que modela frutos totales.

Table 7. Parameters values used in total fruit modeling equation.

Parámetros	Triple Star	Triple 4	Valor propuesto
α_f (d ⁻¹)	0.9	0.4	0.7
v (nodo ⁻¹)	0.77	0.78	0.77

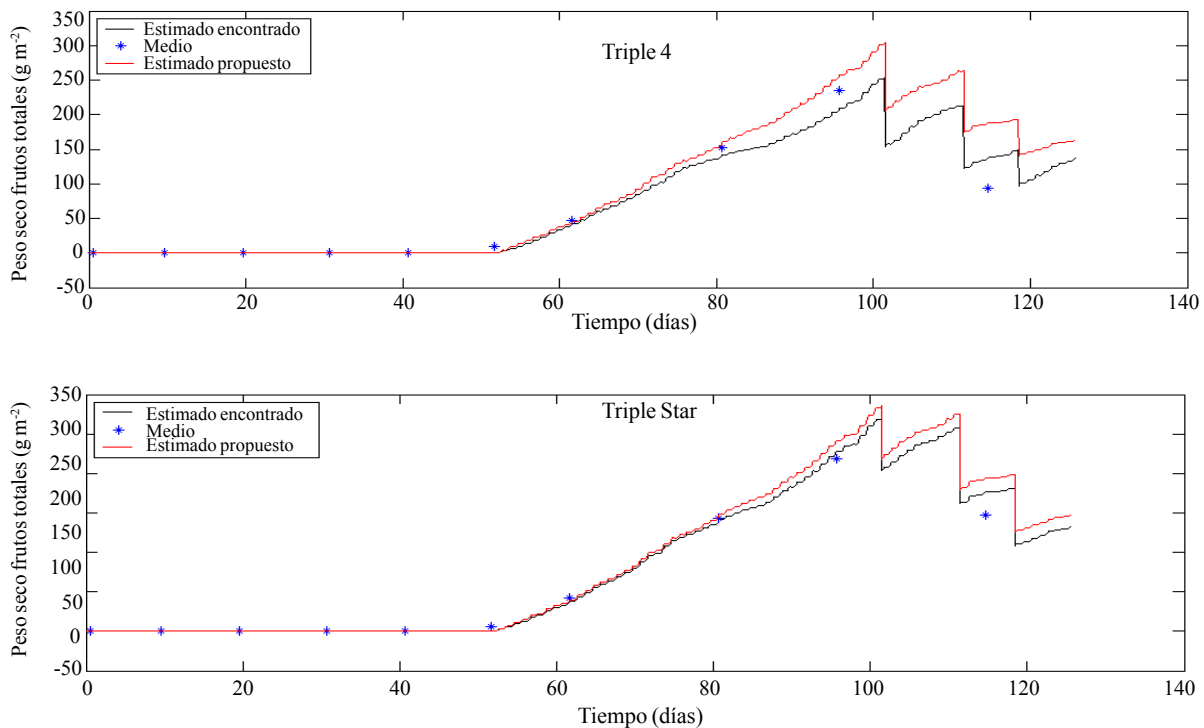


Figura 6. Predicción de la biomasa total de frutos de las variedades de pimiento.
Figure 6. Prediction of fruits total biomass of pepper varieties.

Se puede observar en la figura de la predicción de la biomasa total de frutos (Figura 6), que el modelo hace una sobreestimación en la parte final del experimento, situación que también se ha señalado en otros reportes (Ramírez, 2005; Marcelis *et al.*, 2006). Esto puede deberse a la falta de datos en esa parte para hacer una mejor estimación o bien a las fluctuaciones que presenta el desarrollo de frutos, lo cual es un inconveniente para la planeación de la producción.

Biomasa total de frutos maduros

La función que representa el desarrollo de frutos maduros dependiendo de la temperatura promedio diaria $f_{df}(T_d)$ se propuso de la siguiente manera:

$$f_{df}(T_d) = h_{df} \exp(-((T_d - T_{dfm}) / T_{dfs})^2)$$

Con los valores estimados de los parámetros en cuanto a esta variable sugieren que la temperatura óptima para el desarrollo de frutos maduros (T_{dfm}) se encuentra entre 26 y 27 °C (Figura 7).

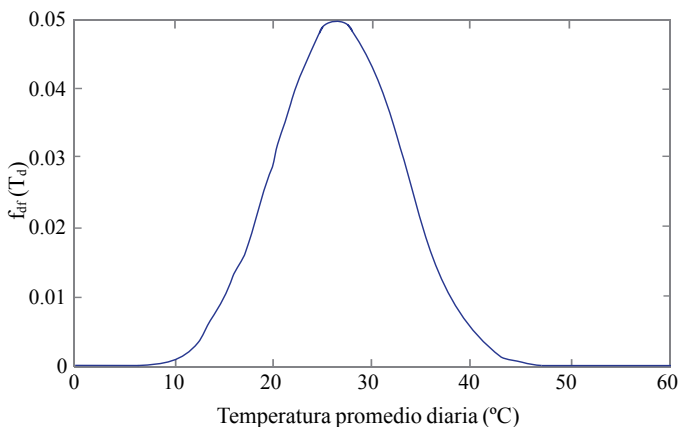


Figura 7. Efecto de la temperatura en la partición de biomasa para los frutos maduros en pimiento utilizando el promedio de ambas variedades.

Figure 7. Effect of temperature on biomass partitioning for mature pepper fruit, using the average of both varieties.

Mientras que el valor h_{df} representaría la tasa de cambio máxima de frutos maduros por día; es decir, el valor que se obtuvo indicaría que aproximadamente 5% del fruto se madura por día, considerando desde el momento en que este brota a una temperatura promedio optima (Cuadro 8). Esto pareciera razonable si se considera que desde el inicio de la fructificación hasta que hubo frutos maduros, transcurrieron alrededor de 28 días, que significa que estuvo madurando a una velocidad un poco menor que la máxima estimada.

This suggests to review this factor in detail, since a very low α_f value, would be reflected in a delayed development of new fruit, although in the simulation with the proposed value of 0.7, the simulation behavior at the fruiting beginning, fits better than the estimated value (Figure 6). v estimating differs from the proposed (0.2) in previous reports (Jones *et al.* 1999; Ramírez, 2005).

As shown in Figure 6, model tends to overestimates at the end of the experiment; this situation has also been noted in other reports (Ramírez, 2005; Marcelis *et al.*, 2006). This may be due to the lack of data, to make a better estimation or to fruit development fluctuation, which is inconvenient for production planning.

Total biomass of ripe fruits

Function that represents the development of ripe fruit, depending on daily temperature average $f_{df}(T_d)$ was proposed as follows:

$$f_{df}(T_d) = h_{df} \exp(-((T_d - T_{dfm}) / T_{dfs})^2)$$

With the estimated parameters in this variable, is suggested that optimum temperature for mature fruits development (T_{dfm}) is between 26 and 27 °C (Figure 7).

While h_{df} value represents the maximum change rate of ripe fruits per day, i.e., obtained value would indicate that approximately 5% of fruit, matures per day, considered since the moment it rises at an optimal average temperature (Table 8). This seems reasonable considering that since fruiting beginning until mature fruits appearance, it took about 28 days, which means that it was maturing at a lower rate than the maximum estimated.

Cuadro 8. Valores obtenidos de los parámetros para la función $f_{df}(T_d)$ que representa el desarrollo de frutos maduros por día.

Table 8. Parameters obtained values for $f_{df}(T_d)$ function, which represents development of mature fruits per day.

Parámetros	Triple Star	Triple 4	Valor propuesto
T_{dfm} °C	26	27	26.5
T_{dfs}	8.2	9.7	9
h_{df}	0.04	0.06	0.05

El comportamiento del modelo respecto al crecimiento de frutos maduros, con los parámetros estimados por variedad y con los valores propuestos, se ajustan adecuadamente a ambas variedades. Gráficamente se observa poca diferencia en ambas variedades, con las dos formas de predecir la biomasa total de frutos maduros; aunque en general, el ajuste de ésta variable no es tan adecuado.

Esto se refiere tal vez porque la producción de chile pimienta en invernaderos, es caracterizada por las fluctuaciones en el número de frutos producidos en el tiempo; esto es, semanas con alta producción alternadas con semanas de baja producción (Van Henten *et al.*, 2006). Las diferentes influencias ambientales así como las características de las plantas, probablemente tienen un efecto en el patrón de producción (Verroens *et al.*, 2006). En todo caso para un ajuste mayor en esta variable habría que explorar otro modelo que se ha propuesto recientemente (Yuntao *et al.*, 2009).

CONCLUSIONES

A través del modelo generado se pudo estimar las condiciones de temperatura adecuadas, para el crecimiento del material usado y este fue coincidente con lo reportado previamente por otros investigadores.

El modelo TOMGRO con las modificaciones que se generaron en este trabajo, puede utilizarse para simular el crecimiento y desarrollo del pimienta en invernaderos con tecnología intermedia, en las condiciones climáticas de México.

Se ha logrado obtener ajustes satisfactorios de las variables involucradas en el modelo, pero es necesario seguir perfeccionando los segmentos relacionados con la variable de frutos maduros.

AGRADECIMIENTOS

El autor principal y coautores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) la beca de maestría, y al proyecto PROMEP 39/Rev 03 por los recursos brindados para ésta investigación.

Model behavior regarding to mature fruits growth, with estimated parameters per variety and proposed values, are appropriate for both varieties. Graphically, there is little difference in both varieties, with two ways to predict total biomass of mature fruits; in general, this variable adjustment is not appropriate.

Chili peppers production in greenhouses, is characterized by fluctuations in fruits number produced in time, alternating weeks with high production with low production weeks (Van Henten *et al.*, 2006). Different environmental influences and plants characteristics probably have an effect on production pattern (Verroens *et al.*, 2006). For a higher adjustment in this variable we should explore another recently proposed model (Yuntao *et al.*, 2009).

CONCLUSIONS

Through the model generated, we were able to estimate appropriate temperature conditions for used material growth and this coincided with previously reports from other researchers.

TOMGRO model with generated modifications in this work can be used to simulate growth and development of pepper in greenhouses with intermediate technology, in Mexico's climatic conditions.

A satisfactory setting of the variables involved in the model was achieved, but it is necessary to refine related segments with ripe fruits variable.

End of the English version



LITERATURA CITADA

- Bouman, B. A. M.; Van Keulen, H.; Van Laar, H. H. and Rabbinge, R. 1996. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agric. Sys.* 52. (2-3):171-198.
- Cohen, J. and Cohen, P. 1983. *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences*. L. Erlbaum Associates (Hillsdale, N. J.). 2nd Edit. 545 p.

- Fourcaud, T.; Zhang, X.; Stokes, A.; Lambers, H. and Korner, Ch. 2008. Plant growth modelling and applications: the increasing importance of plant architecture in growth models. *Ann. Bot.* 101:1053-1063.
- Gijzen, H.; Vegter, J. G. and Nederhoff, E. M. 1990. Simulation of greenhouse crop photosynthesis: validation with cucumber, sweet pepper and tomato. *Acta Hort.* 268:71-80.
- Goudriaan, J. and Van Laar, H. H. 1994. Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers. 238 p.
- Hendrickx, P. M. S. and Martins, J. C. 2008. A user-friendly Matlab program and GUI for the pseudorotation analysis of saturated five-membered ring systems based on scalar coupling constants. *Chem. Central J.* 2:20 doi: 10.1186/1752-153X-2-20
- Hernández, H. F. 2009. Simulación del crecimiento y desarrollo del chile pimiento (*Capsicum annuum* L.) para mejorar su producción en condiciones controladas. Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. 65 p.
- Heuvelink, E. 1999. Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development. *Ann. Bot.* 83:413-422.
- Jimenez-Vazquez, D. 2006. Estudio monográfico de la producción hidropónica del cultivo del pimiento (*Capsicum annuum* L.). Tesis de Maestría. Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. 87 p.
- Jones, J. W.; Kenig, A. and Vallejos, C. E. 1999. Reduced state-variable tomato growth model. *Transactions of the ASAE.* 42(1):255-265.
- Jones, J. W.; Dayan, E.; Allen, L. H.; Van Keulen, H. and Challa, H. 1991. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Transactions of the ASAE.* 34(2):663-672.
- Lacointe, A. 2000. Carbon allocation among tree organs: a review of basic processes and representation in functional-structural tree models. *Ann. For. Sci.* 57:521-533.
- López, I. L.; Rojano, A.; Ramírez, A. y Bonilla, M. 2006. Modelos matemáticos para el crecimiento y desarrollo de cultivos: concepto y metodología. Universidad Autónoma Chapingo. 79 p.
- Marcelis, L. F. M.; Elings, A.; Dieleman, J. A.; De Visser, P. H. B.; Bakker, M. J. and Heuvelink, M. J. 2006. Modeling dry matter production and partitioning in sweet pepper. *Acta Hort.* 718:121-128.
- Nederhoff, E. M. and Vegter J. G. 1994. Canopy photosynthesis of tomato, cucumber and sweet pepper in greenhouses: measurements compared to models. *Ann. Bot.* 73:421-47.
- Ramírez, A. A. 2005. Control jerárquico multiobjetivo de crecimiento de cultivos bajo invernadero. Tesis Doctoral. Universidad de Almería, España. 153 p.
- Reeves, C. R. and Rowe, J. C. 2004. Genetic algorithms: principles and perspectives. Kluwer Academic Publishers. Second printing. 344 p.
- Rico, J. A. 1983. Cultivo del pimiento de carne gruesa en invernadero. Publicaciones de extensión agraria. Madrid, España. 268 p.
- Van Henten, E. J.; Buwalda, F.; De Zwart, H. F.; De Gelder, A.; Hemming, J. and Bontsema, J. 2006. Toward an optimal control strategy for sweet pepper cultivation 2. Optimization of the yield pattern and energy efficiency. *Acta Hort.* 718:391-398.
- Verroens, P.; Sauviller, C.; Verlinden, B.; Lammertyn, J.; De Ketelaere, B. and Nicolaï, B. (2006). Time series analysis of *Capsicum annuum* fruit production cultivated in greenhouse. Third International Symposium on Models for Plant Growth. Environmental control and farm management in protected cultivation, HortiModel 2006. Wageningen, The Netherlands. 453 p.
- Wubs, A. M.; Ma, Y.; Heuvelink, E. and Marcelis, L. F. M. 2009. Genetic differences in fruit-set patterns are determined by differences in fruit sink strength and a source: sink threshold for fruit set. *Ann. Bot.* 104:957-964.
- Yuntao, Ma.; Mathieu, A.; Wubs, A. M.; Heuvelink, E.; Zhu, J.; Hu, B.; Cournède, P. H. and De Reffye, P. 2009. Parameter estimation and growth variation analysis in six capsicum cultivars with the functional-structural model GreenLab. Third International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications. 183-190 pp.