

Análisis de la productividad del tomate en invernadero bajo diferentes manejos mediante modelos mixtos

Analysys of greenhouse tomato productivity under different management practices through mixed models

CARLOS RICARDO BOJACÁ^{1,3}
NADIA YURANI LUQUE²
OSCAR IVÁN MONSALVE²

**Montaje experimental
para el análisis de la
productividad en tomate.**

Foto: C.R. Bojacá



RESUMEN

La productividad del cultivo de tomate bajo invernadero es resultado de la interacción de factores ecofisiológicos, de los cuales el productor ejerce un mayor o menor grado de control sobre ellos. Factores como densidad de plantación y poda de frutos determinan la productividad y el agricultor aplica sus propios esquemas de manejo de acuerdo con su criterio. Con el fin de evaluar diferentes estrategias de manejo de densidad de plantación y poda de frutos y su efecto sobre la productividad se aplicó la técnica de modelación estadística denominada modelos mixtos. Estos modelos aparte de incluir efectos fijos incluyen efectos aleatorios para cada uno de los individuos de la población estudiada. La productividad acumulada por planta en función de los días después del trasplante para nueve combinaciones de densidad de plantación y poda de frutos se ajustó a un modelo Gompertz donde el mejor ajuste fue obtenido con el modelo mixto al cual se le añadió un efecto aleatorio a la asíntota superior. Este parámetro representa la productividad potencial de cada uno de los tratamientos. Con base en la variabilidad del efecto aleatorio de la asíntota superior, producto de la calibración del modelo, se construyó una función de densidad de probabilidad. De acuerdo con esta función, el tratamiento con la productividad potencial más alta (6,82 kg/planta) fue aquel con una densidad de plantación de 2,3 plantas/m² y con una poda de cinco frutos en los primeros cuatro racimos y cuatro frutos en el resto de racimos.

¹ Programa de Control de Clima y Fisiología de Cultivos, Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Chía (Colombia).

² Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Chía (Colombia).

³ Autor para correspondencia. carlos.bojaca@utadeo.edu.co

Palabras clave adicionales: función Gompertz, efectos aleatorios, densidad de plantación, poda de frutos, Sabana de Bogotá.

ABSTRACT

Greenhouse tomato productivity is the result of an interaction of ecophysiological factors, in where some of these could be controlled by the grower to a certain extent. The factors, such as planting density and fruit pruning, determine this productivity and growers apply their own management schemes according to their criteria. In order to evaluate different planting densities and fruit pruning strategies on tomato productivity, the statistical modelling technique known as mixed models was applied. These models not only include fixed effects but also random effects to each one of the individuals of the population under study. Cumulated productivity per plant as a function of days after transplanting for nine planting density and fruit pruning combinations was calibrated to a Gompertz model where the best fit was obtained for the mixed model where a random effect was adjusted to the upper asymptote. This parameter represents the potential productivity for each one of the treatments. Based on the variability found for the random effect, as a result of model calibration, a probability density function was created. According to this function, the treatment with the highest potential productivity was the one planted at 2.3 plants/m² and a pruning of five fruits for the first four trusses and four fruits for the rest of developed trusses.

Additional key words: Gompertz function, random effects, planting density, fruit pruning, Bogota Plateau.

Fecha de recepción: 29-09-2009

Aprobado para publicación: 30-11-2009

INTRODUCCIÓN

La densidad de plantación y la poda de frutos en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo invernadero son unas de las prácticas de manejo que determinan la productividad del cultivo. En Colombia, los productores aplican diversas combinaciones de estas prácticas alcanzando niveles de productividad variables. La densidad de plantación es un factor determinante para la intercepción de la radiación solar y la captación de agua y nutrientes por las plantas. Así, este factor de manejo afecta directamente eventos fisiológicos relacionados con la producción y acumulación de materia seca en los diferentes órganos de la planta (Rodríguez, 2000).

La poda de flores y frutos es una práctica recomendada con el propósito de balancear el

crecimiento vegetativo con el generativo, para optimizar el número y el tamaño de los frutos en el racimo a lo largo de la planta. El tamaño potencial de un fruto de tomate depende de su posición dentro del racimo y del cultivar (Ho, 1992) pero el tamaño alcanzado depende de la cantidad de asimilados producidos por las hojas y del número de frutos que compiten por estos asimilados (Ho, 1980). El manejo de la poda de frutos no tiene una fórmula general y depende de variables como variedad, condiciones climáticas, el estado de desarrollo de las plantas, su vigor y las exigencias del mercado (Escobar, 2001).

Evaluaciones del efecto de la densidad de plantación así como de la poda de frutos sobre la productividad del cultivo se han realizado tanto

a nivel local como internacional (ej. Ara *et al.*, 2007; Barraza *et al.*, 2004; Cruz *et al.*, 2003; Ghebremariam, 2004; Mantur y Steel, 2008; Peil y Galvez, 2004; Sandri *et al.*, 2003). El análisis de los datos recolectados y las conclusiones de todos estos trabajos se han basado en análisis estadísticos tradicionales tales como análisis de varianzas y pruebas de comparación de medias. El presente trabajo propone la utilización de modelos estadísticos predictivos como los modelos mixtos.

Hoy, los modelos mixtos representan una de las técnicas más robustas para modelar datos provenientes de mediciones repetidas de una muestra de individuos o unidades experimentales de una población de interés (Davidian y Giltinan, 2003). El término “mixto” se refiere a la capacidad de este método para combinar efectos fijos y aleatorios en un solo modelo, teniendo en cuenta la variabilidad normalmente presente dentro de una población determinada. Al añadir efectos aleatorios al modelo es posible representar apropiadamente la estructura de varianzas-covarianzas asociadas con los datos, permitiendo realizar inferencias más precisas (Carrero *et al.*, 2008). Esta técnica estadística ha sido ampliamente aplicada en diversos campos como la biología, la agricultura y la medicina (Bolker *et al.*, 2009; Godoy *et al.*, 2008; Soop So y Edwards, 2009; Malosetti *et al.*, 2007; Paterson y Lello, 2003; Vangeneugden *et al.*, 2004).

El hábito de crecimiento indeterminado que presentan los materiales de tomate comúnmente sembrados bajo invernadero y su característica de producción continua una vez maduran los frutos permiten la aplicación de modelos mixtos para estimar la productividad de este cultivo.

El objetivo del presente trabajo fue el de analizar la productividad del sistema de producción de tomate en invernadero bajo diferentes estrategias de densidad de plantación y poda de frutos, mediante la aplicación de modelos mixtos. Como objetivos específicos del trabajo se propusieron el comparar el desempeño del modelo mixto

versus el modelo tradicional que considera únicamente efectos fijos y establecer los potenciales de productividad de las diferentes estrategias de manejo, con base en la estructura de los efectos aleatorios del modelo mixto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Montaje experimental

El montaje experimental de campo se realizó en uno de los invernaderos del Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales (04°53' N, 74°00' W y a una altura de 2.650 msnm) de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, ubicado en el municipio de Chía. En una sección de invernadero (550 m²) bajo hidroponía se trasplantó un cultivo de tomate cv. Sheila (Sakata, Japón), utilizando cascarilla de arroz cruda como sustrato. El cultivo fue trasplantado el 22-04-08 y el ciclo de producción se extendió por un periodo de 223 d. Las plantas fueron manejadas a un solo tallo y guiadas mediante el sistema de colgado.

Dentro de este cultivo se estableció un diseño experimental completamente aleatorizado con arreglo factorial 3×3, donde los factores fueron la densidad de plantación y la poda de frutos. La descripción de los tratamientos se presenta en la tabla 1. Dentro del área experimental se establecieron cuatro réplicas por tratamiento para un total de 36 unidades experimentales (7,5 m² cada una). Las camas externas así como los extremos (1,5 m) de las camas internas se excluyeron del área experimental para evitar el efecto de borde.

Adquisición de datos

La recolección de datos consistió en registrar la cantidad en kilogramos de tomate producido en cada una de las unidades experimentales desde el momento en que inició la maduración de los primeros frutos. Con base en la densidad de plantación de cada uno de los tratamientos la cantidad producida por unidad experimental fue

llevada a kilogramos por planta. La productividad diaria se fue acumulando progresivamente durante todo el periodo que duró la cosecha. En total se realizaron 36 pases de cosecha durante todo el ciclo productivo del cultivo, cosechando dos a tres veces por semana dependiendo de la cantidad de tomate que iba alcanzando el punto de maduración comercial. Los datos de cosecha de las cuatro réplicas por tratamiento en cada día de cosecha fueron promediados y con estos valores se realizó la calibración de los modelos.

Calibración de modelos

Luego de una exploración inicial de la tendencia de las curvas de cosecha en cada unidad experimental, se seleccionó un modelo Gompertz como el más adecuado para representar la productividad acumulada de tomate en función de los días después del trasplante (ddt). Con el fin de definir los valores iniciales de los parámetros del modelo mixto se realizó una calibración preliminar considerando el conjunto total de datos.

Así los valores observados fueron ajustados al modelo Gompertz definido por

$$y_{ij} = a \times \exp(-b \times c^{x_i}) \quad (1)$$

donde y_{ij} representa la productividad acumulada (kg/planta) en el i -ésimo día después del trasplante para el j -ésimo tratamiento, x_i es el correspondiente día después del trasplante, el parámetro a representa la asíntota superior, c es el parámetro que indica la máxima tasa de productividad en el punto de inflexión y d representa la abscisa en el punto de inflexión. Esta primera calibración del modelo, de ahora en adelante denominada como modelo de efectos fijos, fue utilizada posteriormente para comparar la bondad de ajuste del modelo mixto no lineal.

En el caso del modelo mixto no lineal, el modelo Gompertz fue redefinido de acuerdo con la siguiente fórmula

$$y_{ij} = (a + u_{aj}) \times \exp(-b \times c^{x_i}) + e_{ij} \quad (2)$$

Tabla 1. Descripción de los tratamientos densidad:poda evaluados con el fin de analizar la productividad del cultivo de tomate bajo invernadero cultivado en la Sabana de Bogotá mediante modelos mixtos no lineales.

Tratamiento	Densidad (plantas/m ²)	Poda
2.3:4R6F-4R5F-4R3FR	2,3	6 frutos en los primeros 4 racimos, 5 frutos en los 4 racimos siguientes y 3 frutos en los racimos siguientes
2.3:4R5F-8R4F	2,3	5 frutos en los primeros 4 racimos y 4 frutos en los racimos siguientes
2.3:4F	2,3	4 frutos en todos los racimos de la planta
2.7: 4R6F-4R5F-4R3FR	2,7	6 frutos en los primeros 4 racimos, 5 frutos en los 4 racimos siguientes y 3 frutos en los racimos siguientes
2.7: 4R5F-8R4F	2,7	5 frutos en los primeros 4 racimos y 4 frutos en los racimos siguientes
2.7:4F	2,7	4 frutos en todos los racimos de la planta
3.6: 4R6F-4R5F-4R3FR	3,6	6 frutos en los primeros 4 racimos, 5 frutos en los 4 racimos siguientes y 3 frutos en los racimos siguientes
3.6: 4R5F-8R4F	3,6	5 frutos en los primeros 4 racimos y 4 frutos en los racimos siguientes
3.6:4F	3,6	4 frutos en todos los racimos de la planta

donde u_{aj} representa el efecto aleatorio añadido a la asíntota para representar de manera individual cada uno de los tratamientos densidad: poda, tal como se definieron en la tabla 1, mientras que e_{ij} representan los errores residuales, independientes de los efectos aleatorios. Se asume que el efecto aleatorio u_{aj} así como los errores residuales e_{ij} presentan una distribución normal (Lindstrom y Bates, 1990). La adición de un único efecto aleatorio a la asíntota del modelo fue el resultado de la exploración de todas las combinaciones posibles entre efectos fijos (a , b y c) y aleatorios (u_{aj} , u_{bj} y u_{cj}), donde el mejor ajuste fue obtenido con el modelo representado por la ecuación 2. Los criterios utilizados para la selección de este modelo fueron el logaritmo de máxima verosimilitud (log-Lik), el criterio de información de Akaike (AIC), el criterio de información Bayesiano (BIC) y la desviación. Estos criterios son comúnmente utilizados para comparar el grado de ajuste entre modelos, siendo el mejor modelo aquel que presente los valores más bajos para todos estos criterios.

Una vez que los valores iniciales fueron calculados, el modelo mixto no lineal fue calibrado mediante el procedimiento nlmer incluido en el paquete lme4 (Bates y Maechler, 2009) del *software* de análisis estadístico R versión 2.10.1 (R Development Core Team, 2009). Este procedimiento realiza el ajuste del modelo con los datos observados mediante el método condicional de primer orden conocido como aproximación de Laplace. El objetivo de este método iterativo consiste en aproximar la integral usando una aproximación cuadrática alrededor del punto en el cual el integrando toma su máximo valor (Demidenko, 2004).

El grado de bondad de ajuste entre los modelos de efectos fijos y mixto no lineal se comparó mediante el cálculo del cuadrado medio del error (CME, kg/planta) de las predicciones (\hat{y}_{ij}) comparado con los valores promedio observados (y_{ij}). El CME se define mediante la fórmula

$$CME = \sum_{i=1}^n \frac{(y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2}{n} \quad (3)$$

y representa un índice de bondad de ajuste que puede ser utilizado para comparar los dos tipos de modelos.

Finalmente la productividad potencial, definida por la asíntota superior de cada uno de los tratamientos ($a+u_{aj}$), fue analizada con base en los resultados de la calibración del efecto aleatorio. A partir de la desviación estándar de u_{aj} se construyó una función de densidad de probabilidad (Laurencelle y Dupuis, 2002). Las productividades potenciales se incluyeron dentro de dicha función de densidad para determinar la ubicación de los tratamientos densidad:poda dentro de la distribución.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración del modelo mixto no lineal

Los criterios de ajuste para todas las combinaciones posibles entre efectos fijos y aleatorios para el modelo Gompertz seleccionado se presentan en la tabla 2. El modelo que incluye los tres efectos aleatorios, es decir aquel con seis parámetros calibrados, no mejoró el grado de ajuste del modelo lo que implica que no es necesario incluir todos los efectos aleatorios en el modelo. Los criterios de ajuste para todos los modelos considerados son relativamente similares, aunque el modelo que incluyó únicamente efectos aleatorios para el parámetro b fue el que presentó los valores más altos para todos los criterios, excepción hecha del criterio log-Lik. Por consiguiente este modelo fue el que realizó la peor representación de los datos observados.

Con base en los resultados conjuntos para todos los criterios considerados, el modelo que única-

Tabla 2. Criterios de ajuste para los modelos mixtos no lineales utilizados para calibrar la productividad del tomate bajo invernadero cultivado en la Sabana de Bogotá en función de los días después del trasplante.

Modelo	K	log-Lik	AIC	BIC	Desviación
$y_{ij} = (a + u_{aj}) \times \exp^{-(b+u_{bj}) \times (c+u_{cj})^{xi}} + e_{ij}$	6	-93,3	206,7	258,3	186,7
$y_{ij} = (a + u_{aj}) \times \exp^{-(b+u_{bj}) \times c^{xi}} + e_{ij}$	5	-93,4	200,8	237,0	186,8
$y_{ij} = (a + u_{aj}) \times \exp^{-b \times (c+u_{cj})^{xi}} + e_{ij}$	5	-93,4	200,8	236,9	186,8
$y_{ij} = a \times \exp^{-(b+u_{bj}) \times (c+u_{cj})^{xi}} + e_{ij}$	5	-104,9	223,8	260,0	209,8
$y_{ij} = (a + u_{aj}) \times \exp^{-b \times c^{xi}} + e_{ij}$	4	-93,5	196,9	222,8	186,9
$y_{ij} = a \times \exp^{-(b+u_{bj}) \times c^{xi}} + e_{ij}$	4	-188,1	386,2	412,0	376,2
$y_{ij} = a \times \exp^{-b \times (c+u_{cj})^{xi}} + e_{ij}$	4	-115,3	240,6	266,4	230,6

K, número de parámetros del modelo; log-Lik, logaritmo de máxima verosimilitud; AIC, criterio de información de Akaike; BIC, criterio de información bayesiano.

mente incluyó efectos aleatorios para la asíntota superior (a) fue el seleccionado para representar adecuadamente la productividad por planta de cada uno de los tratamientos de densidad:poda. Aunque los valores de log-Lik y desviación fueron similares a los de otros modelos evaluados, la decisión en la selección de este modelo se tomó con base en los bajos valores de AIC y BIC que se presentaron.

La calibración del modelo mixto seleccionado indicó que los valores de los efectos fijos fueron $a = 5,39$, $b = 158,3$ y $c = 0,97$, con errores estándar iguales a 0,11, 17,6 y 0,0008, respectivamente. Estos efectos fijos representan el promedio de la población que se está analizando y los valores de estos parámetros para el modelo de efectos fijos son los mismos. La adición de los efectos aleatorios u_{aj} para cada uno de los tratamientos de densidad:poda dió como resultado las simulaciones incluidas en la figura 1. Los datos observados para cada una de las réplicas describen la curva característica sigmoideal de la productividad de la planta de tomate, donde la tasa de productividad es baja al comienzo y al final del periodo de cosecha.

Para todos los tratamientos, la adición del efecto aleatorio a la asíntota superior al modelo representa de forma casi perfecta la curva promedio para cada uno de los tratamientos densidad:poda. El modelo de efectos fijos, al ser una representación promedio de todos los tratamientos, sobreestima las productividades en los tratamientos con la densidad de plantación más alta (3,6 plantas/m²) mientras que subestima la productividad en casi todos los tratamientos con la densidad más baja (2,3 plantas/m²).

Los resultados del CME (tabla 3) en ambos modelos y para cada uno de los tratamientos densidad:poda confirma que el mejor grado de ajuste se obtuvo con el modelo mixto no lineal. En promedio el CME para los tratamientos del modelo de efectos fijos fue de 0,166 kg/planta mientras que el promedio para el modelo mixto no lineal fue de 0,009 kg/planta. Para todos los tratamientos, el CME fue menor para las simulaciones realizadas con el modelo mixto no lineal reportándose los valores más bajos para los tratamientos 3.6:4F y 3.6:4R6F-4R5F-4R3F. Los valores más altos de CME se presentaron en los tratamientos 2.3: 4R6F-4R5F-4R3F y 2.7:4F.

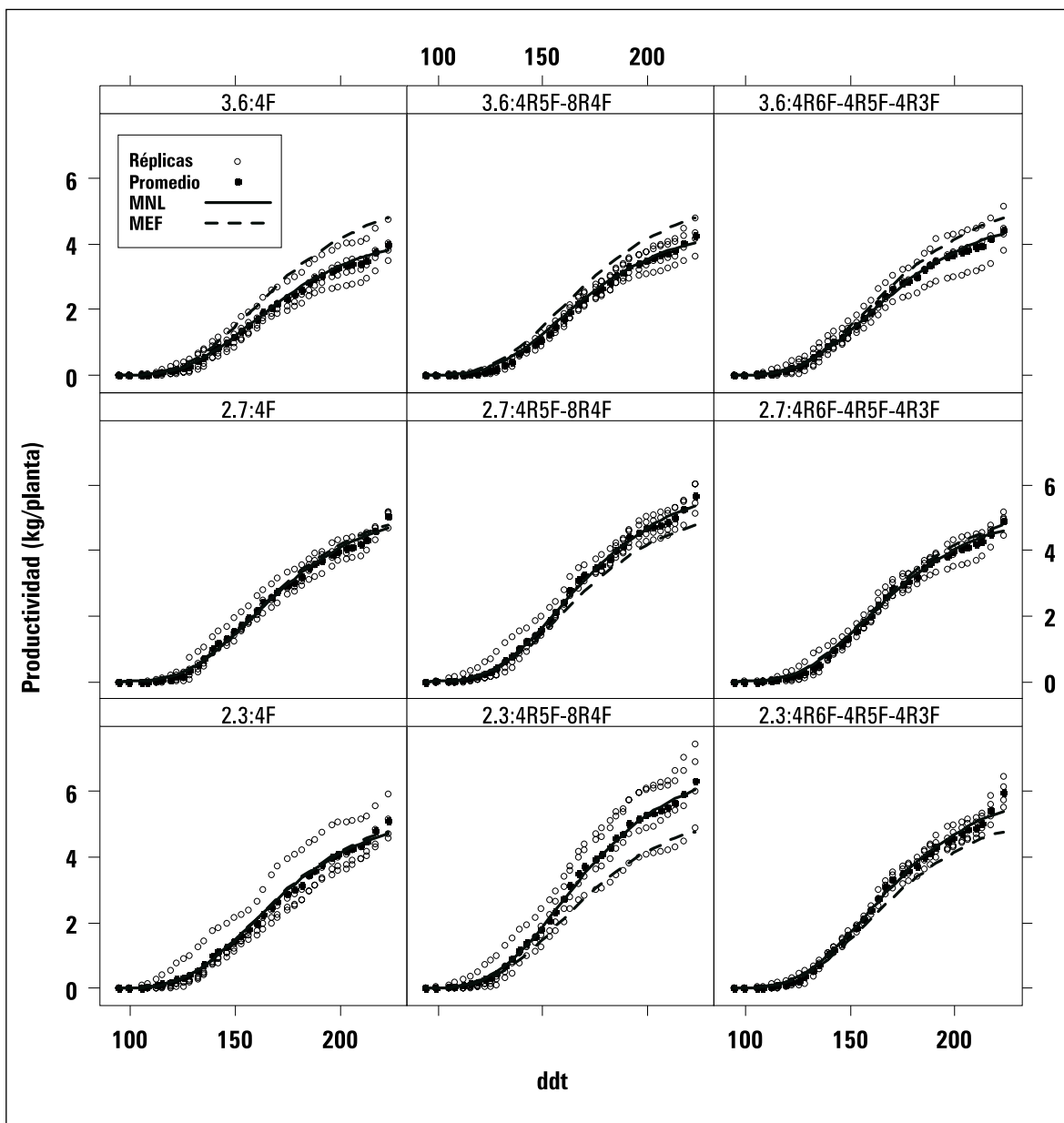


Figura 1. Valores observados por réplica y su promedio así como estimaciones de los modelos Gompertz (MNL: mixto no lineal y MEF: efectos fijos) para la productividad acumulada de tomate en función de los días después del trasplante (ddt) de cada uno de los tratamientos de densidad:poda evaluados en un cultivo de bajo invernadero establecido en la Sabana de Bogotá.

Análisis de la productividad máxima esperada

La asíntota superior del modelo representa el parámetro que define la máxima productividad que puede alcanzar cada uno de los tratamientos de densidad:poda con base en el efecto alea-

torio aplicado a cada uno de esos tratamientos. De acuerdo con las calibraciones presentadas en la figura 1, se aprecia que la característica curva sigmoidal en cada uno de los casos no se alcanzó hasta el momento en el cual se finalizó el periodo de cosecha. De esta forma analizar la máxima productividad que se puede esperar contribuye a

Tabla 3. Cuadrado medio del error (kg/planta) de cada uno de los tratamientos densidad:poda estimados para las simulaciones realizadas por dos tipos de modelos calibrados para determinar la productividad del cultivo de tomate bajo invernadero en función de los días después del trasplante: modelo de efectos fijos y modelo mixto no lineal.

Tratamiento	Modelo efectos fijos	Modelo mixto no lineal
2.3:4R6F-4R5F-4R3FR	0,011	0,010
2.3:4R5F-8R4F	0,576	0,010
2.3:4F	0,150	0,017
2.7: 4R6F-4R5F-4R3FR	0,017	0,013
2.7: 4R5F-8R4F	0,131	0,008
2.7:4F	0,018	0,008
3.6: 4R6F-4R5F-4R3FR	0,323	0,004
3.6: 4R5F-8R4F	0,191	0,008
3.6:4F	0,080	0,005

establecer las diferencias entre los tratamientos evaluados.

La función de densidad de probabilidad construida con base en la variabilidad de la asíntota superior (asumiendo una distribución normal y con media = a y varianza = 0,073) estimada por los efectos aleatorios del modelo mixto se presenta en la figura 2. Al añadir los efectos aleatorios al efecto fijo de la asíntota superior, la función de densidad de probabilidad presenta una distribución normal con promedio igual al efecto fijo estimado para el modelo. Dentro de la función de densidad de probabilidad se incluyeron las asíntotas de cada uno de los tratamientos de densidad:poda con el fin de conocer la ubicación de la máxima productividad de cada uno de ellos dentro de la distribución de la población.

Los tratamientos con densidad de plantación igual a 3,6 plantas/m² se ubican hacia el extremo izquierdo de la función de densidad indicando los valores más bajos de productividad esperada. El tratamiento con poda de cuatro frutos en todos los racimos fue el que presentó la productividad esperada más baja (4,32 kg/planta), indicando que se está aprovechando mínimamente el potencial productivo de la planta bajo estas condiciones de manejo. Dentro de estos tratamientos, plantados a 3,6 plantas/m², la produc-

tividad esperada más alta fue la del tratamiento con una poda de seis frutos en los primeros cuatro racimos, cinco frutos en los siguientes cuatro racimos siguientes y tres frutos en los siguientes racimos desarrollados.

Los tratamientos con densidad de plantación 2,3 y 2,7 plantas/m² y podados a cuatro frutos en todos los racimos presentaron las productividades esperadas más cercanas al promedio de la población con valores de 5,31 y 5,27 kg/planta, respectivamente. La disminución en la densidad de plantación permite una mayor acumulación de materia seca en los frutos a pesar de aplicar una poda de frutos relativamente extrema al eliminar gran parte del potencial productivo que la planta está en capacidad de exhibir.

Los otros dos tratamientos plantados a 2,3 plantas/m² fueron los que se ubicaron más al extremo de la cola derecha de la función de densidad. Aplicando una poda de cinco frutos en los primeros cuatro racimos y cuatro frutos en el resto de racimos alcanza una productividad esperada de 6,82 kg/planta mientras que aplicando una poda de seis frutos en los primeros cuatro racimos, cinco frutos en los siguientes cuatro racimos y tres frutos en el resto de racimos puede llegar a una productividad máxima de 6,09 kg/planta.

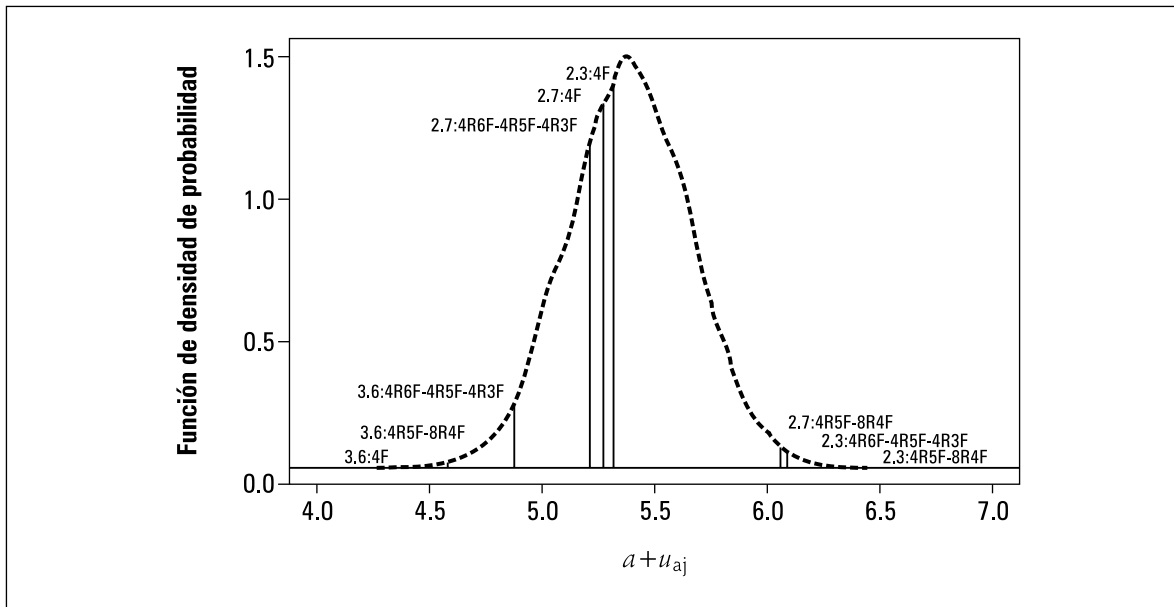


Figura 2. Función de densidad de probabilidad para la asíntota ($a + u_{aj}$, kg/planta) del modelo mixto no lineal, incluyendo los valores individuales de cada uno de los tratamientos de densidad:poda utilizados para calibrar el modelo.

Las productividades aquí reportadas así como las máximas esperadas son similares e incluso superiores en algunos casos para el rango reportado por Jaramillo (2009), quien en su revisión sobre el estado actual de la investigación del tomate bajo invernadero reportó productividades promedio de entre 5 y 6 kg/planta.

CONCLUSIONES

Los modelos mixtos representan una alternativa de modelación estadística más potente que la aproximación tradicional de una única respuesta, basada en efectos fijos, debido a que este tipo de modelos son capaces de descomponer la variabilidad hallada dentro de la población bajo estudio. El hábito de crecimiento indeterminado y la cosecha continua de materiales vegetales, como los utilizados en el cultivo de tomate bajo invernadero, permiten la aplicación de esta herramienta de modelación basada en medidas repetidas.

La utilización de modelos mixtos aplicados al estudio de la productividad del tomate bajo in-

vernadero permite conocer la productividad esperada de una determinada zona de cultivo teniendo en cuenta los diferentes esquemas de manejo que pueden ser aplicados por los productores. Sin embargo, la aplicabilidad del modelo es limitada a las condiciones particulares de la población bajo estudio. Para el caso presentado el modelo mixto no lineal es válido para representar la productividad del tomate bajo las condiciones en las cuales se realizó el montaje experimental y cualquier extrapolación del modelo a una condición de manejo o ubicación diferente no es recomendada.

Densidades de plantación baja, pero con podas de frutos en las cuales se vayan reduciendo gradualmente el número de frutos que se dejan por racimo, tienen una probabilidad de alcanzar productividades más altas en comparación con densidades de plantación más altas y con podas de frutos en las cuales se reduce drásticamente el potencial productivo de la planta. Una adecuada regulación fuente:vertedero contribuirá a expresar de mejor manera el vigor que la planta va exhibiendo a lo largo de su ciclo productivo.



AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se realizó dentro del marco del proyecto 2007N6436 927-860/2007 titulado “Desarrollo de alternativas de manejo integrado del cultivo del tomate en sistemas de producción bajo invernadero en los municipios de Chía y Susa en Cundinamarca y Piedecuesta en Santander”, cofinanciado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y el Fondo Nacional de Fomento Hortifrutícola, Bogotá.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ara, N.; M. Bashar; S. Begum y S. Kakon. 2007. Effect of spacing and stem pruning on the growth and yield of tomato. *Intl. J. Sustain. Crop Prod.* 2(3), 35-39.
- Barraza, F.; G. Fischer y C. Cardona. 2004. Estudio del proceso de crecimiento del cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en el Valle del Sinú medio, Colombia. *Agron. Colomb.* 22(1), 81-90.
- Bates, D. y M. Maechler. 2009. lme4: Linear mixed-effects models using S4 classes. R package version 0.999375-32. En: <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>; consulta: septiembre de 2009.
- Bolker, B.; M. Brooks; C. Clark; S. Geange; J. Poulsen; H. Stevens y S. White. 2009. Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends Ecol. Evolut.* 24(3), 127-135.
- Carrero, O.; M. Jerez; R. Macchiavelli; G. Orlandoni y J. Stock. 2008. Ajuste de curvas de índice de sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Venezuela. *Interciencia* 33(4), 265-272.
- Cruz, J.; F. Jiménez; J. Ruiz; G. Días; P. Sánchez; C. Perales y A. Arellanes. 2003. Evaluaciones de densidad de siembra en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en invernadero. *Agron. Mesoamer.* 14(1), 85-88.
- Davidian, M. y D. Giltinan. 2003. Nonlinear models for repeated measurement data: An overview and update. *J. Agr. Biol. Environ. Stat.* 8(4), 387-419.
- Demidenko, E. 2004. Mixed models. Theory and applications. Wiley, New Jersey.
- Escobar, H. 2001. Cartilla: Producción de tomate bajo invernadero. CIAA, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Chía, Colombia.
- Ghebremariam, T. 2005. Yield and quality response of tomato and hot pepper to pruning. M.Sc. thesis. Faculty of Natural and Agricultural Sciences, University of Pretoria, South Africa.
- Godoy, C.; G. Monterrubianesi y J. Tognetti. 2008. Analysis of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). *Scientia Hort.* 115(1), 368-376.
- Ho, L.C. 1980. Control of import into tomato fruits. *Ber. Deutsche Bot. Gesellsch.* 93(1), 315-325.
- Ho, L.C. 1992. Fruit growth and sink strength. pp. 101-124. En: Marshall, C. y J. Grace (eds.). *Fruit and seed production. Aspects of development, environmental physiology and ecology.* Society for Experimental Biology Seminar 47. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jaramillo, J. 2009. The state of research in tomato in Colombia. *Acta Hort.* 821, 47-52.
- Laurence, L. y F. Dupois. 2002. Statistical tables, explained and applied. World Scientific, London. pp. 219-221.
- Lindstrom, M. y D. Bates. 1990. Nonlinear mixed models for repeated measures data. *Biometrics* 46(3), 673-687.
- Malosetti, M.; C. Linden; B. Vosean y F. Eewijk. 2007. A mixed-model approach to association mapping using pedigree information with an illustration of resistance to *Phytophthora infestans* in potato. *Genetics* 175(1), 879-889.

- Mantur, S. y P. Satesh. 2008. Influence of spacing and pruning on yield of tomato grown under shade house. *Agr. Sci.* 21(1), 97-98.
- Peil, R. y J. Gálvez. 2004. Rendimiento de plantas de tomate injertadas y efecto de la densidad de tallos en el sistema hidropónico. *Hortic. Bras.* 22(2), 265-270.
- R Development Core Team. 2009. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. En: <http://www.R-project.org>; consulta: septiembre de 2009.
- Rodríguez, L. 2000. Densidad de población vegetal y producción de materia seca. *Revista Comalfi* 27(1-2), 31-38.
- Sandra, M.; J. Andriolo; M. Witter y T. Dal Ross. 2003. Effect of shading on tomato plants grown under greenhouse. *Hortic. Bras.* 21(4), 642-645.
- Soop So, Y. y J. Edwards. 2009. A comparison of mixed-model analyses of the Iowa crop performance test for corn. *Crop Sci.* 49(1), 1593-1601.
- Paterson, S. y J. Lello. 2003. Mixed models: getting the best use of parasitological data. *Trends Parasitol.* 19(8), 65-74.
- Vangeneugdena, T.; A. Laenenb; H. Geysb; D. Renard y G. Molenberghs. 2004. Applying linear mixed models to estimate reliability in clinical trial data with repeated measurements. *Contr. Clinical Trials* 25(1), 13-30.