

Modelación matemática de la calidad del fruto  
de tomate (*Solanum lycopersicum*)

2012

Moisés Alejandro Vázquez Cruz



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

Modelación matemática de la calidad fisicoquímica y  
sensorial del fruto de tomate (*Solanum lycopersicum*)

Tesis  
Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Doctor en Ingeniería

Presenta  
Moisés Alejandro Vázquez Cruz

Dirigido por:  
Dr. Ramón Gerardo Guevara González

Santiago de Querétaro, Querétaro, México  
Noviembre del 2012

## RESUMEN

La calidad del fruto es un término complejo definido por una sofisticada cadena de procesos biológicos. Dichos procesos (respiración, fotosíntesis, etc.) involucra intercambios entre el fruto y su ambiente. La integración cuantitativa de estos procesos para monitorear el comportamiento del fruto durante su desarrollo es una tarea que definitivamente debe involucrar la modelación matemática. Actualmente, el interés en la modelación matemática de los cambios en la calidad del fruto ha ido en aumento. Es posible a través de la modelación matemática evaluar la calidad de los productos finales para satisfacer las demandas del consumidor y para ajustar o mejorar las decisiones tomadas con relación a los calendarios de siembra y cosecha y para la comercialización de los frutos. Los modelos deben ser lo suficientemente mecánicos para proporcionar una descripción representativa de los procesos fisiológicos y explicar las variaciones en los rasgos de calidad de los frutos. Los modelos actuales son más precisos y capaces de predecir el comportamiento de interacciones tan complejas como las de tipo genotipo-ambiente. Se han comenzado a hacer esfuerzos por definir aspectos importantes de la calidad de los frutos e integrarlas en los modelos de crecimiento de hortalizas. Técnicas como el análisis sensorial pueden proporcionar información importante para establecer correlaciones entre los atributos sensoriales y fisicoquímicos. Incluyendo dicha información en los modelos matemáticos puede ayudar a tener una comprensión más amplia de la interacción ambiente-metabolismo y su influencia en los atributos de calidad. La agricultura de precisión ofrece la posibilidad de modificar las condiciones de clima con el propósito de mejorar las características fisicoquímicas y sensoriales de los frutos

Palabras clave: Modelación matemática, tomate, TOMGRO, calidad, análisis sensorial, análisis fisicoquímico.

## SUMMARY

Fruit quality is a complex issue defined as a sophisticated chain of biological processes (Genard et al., 2007). These processes (transpiration, respiration, photosynthesis) involve exchanges between the fruit and its environment. Quantitative integration of these processes to monitor fruit's behavior is a task involving physiological modeling. Nowadays, the interest in mathematical modeling about the quality changes during fruit maturation has been increased (Wegehenkel and Mirschel, 2005). It is possible through simulation to evaluate the quality of final products in order to satisfy quality consumer demands and to adjust or improve the decision making related to harvest dates and product commercialization. Adequate models should be mechanistic enough to give a representative description of physiological processes and explain variations in quality traits. Recently, models have become more accurate and better able to predict the outcome of complex issues such as genotype-environment interactions. Furthermore, efforts have been made to define fruit quality and integrating it with crop growth models. These models are based on accurate descriptions of early stages of growth, including fresh fruit mass, dry matter content and concentration of sugars. Nevertheless, most of models do not include variables related to quality traits such as flavor and aroma. GC-O techniques could provide important information in order to establish correlations among physicochemical and sensory attributes. Including this information in mathematical models can lead to a wider comprehension of the metabolism-environment interaction and their influence on quality attributes. Precision agriculture offers the possibility to control environment with the purpose of enhance physicochemical and sensory characteristics in crops.

Key words: Mathematical modeling, tomato, TOMGRO, quality, sensory analysis, physicochemical analysis.

## **AGRADECIMIENTOS.**

- Al Dr. Ramón Guevara González por invitarme a formar parte del grupo de Biosistemas, agradezco su paciencia y sabios consejos, su ejemplo me brindó convicción y ambición para superarme día a día y llegar a la culminación de mi formación como una mejor persona y profesionalista, espero haber cumplido cabalmente con todas sus expectativas.
- Al Dr. Irineo Torres Pacheco, por su dedicación y compromiso en ayudarme a formarme como un investigador crítico y consciente en mi quehacer diario.
- A mis asesores por los valiosos consejos que ayudaron a enriquecer el contenido de este trabajo y a mi formación como Doctor en Ingeniería, les estoy infinitamente agradecido.
- A CONACyT por el apoyo brindado a través de la beca de estudios de posgrado, número de contrato 218413.
- A la Universidad Autónoma de Querétaro por todo el apoyo brindado a través de quienes hicieron posible el cumplimiento de cada uno de los requisitos para alcanzar el grado de Doctor en Ingeniería.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN .....	i
SUMMARY .....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
I INTRODUCCIÓN .....	1
I.1 Antecedentes y Justificación .....	2
I.2 Planteamiento del problema.....	4
I.3 Hipótesis y objetivos .....	5
I.3.1 Hipótesis general.....	5
I.3.2 Objetivo general.....	5
I.3.3 Objetivos específicos .....	5
II REVISIÓN DE LITERATURA .....	6
II.1 Calidad .....	7
II.1.1 Calidad de los productos hortícolas .....	7
II.1.2 Cuantificación de carotenoides y otros compuestos en tomate .....	11
II.1.3 Producción de vegetales en invernadero.....	12
II.2 Influencia de nutrientes y factores ambientales sobre la calidad y desarrollo de frutos	13
II.2.1 Evaluación sensorial de la calidad de productos hortícolas.....	17
III METODOLOGÍA.....	20
III.1 Marco teórico.....	20

III.2	Metodología.....	20
III.2.1	Muestras de tomate .....	21
III.2.2	Pruebas fisicoquímicas.....	22
III.2.3	Análisis de color .....	24
III.2.4	Estimación de área foliar .....	24
III.2.5	Cuantificación de licopeno y $\beta$ -caroteno .....	25
III.2.6	Perfil sensorial descriptivo.....	26
III.2.7	Análisis de sensibilidad del modelo TOMGRO reducido .....	28
III.2.8	Metodología de análisis de sensibilidad global .....	29
III.2.9	Calibración del modelo TOMGRO reducido.....	31
III.3	Análisis estadístico .....	33
III.3.1	Indicadores de ajuste del modelo.....	33
IV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	37
IV.1	Análisis fisicoquímicos.....	37
IV.2	Análisis colorimétricos y correlación con el estado de madurez.....	38
IV.2	Análisis descriptivo sensorial .....	38
IV.3	Análisis PCA y HCA de los descriptores sensoriales.....	41
IV.4	Correlación del contenido de licopeno y $\beta$ -caroteno con los índices de color .....	46
IV.5	Análisis de sensibilidad del modelo TOMGRO .....	49
IV.5.1	Análisis de sensibilidad con el método FAST .....	50
IV.5.2	Análisis de sensibilidad con el método de Sobol'. .....	53
IV.5.3	Calibración del modelo TOMGRO mediante algoritmos evolutivos .....	55
IV.5.4	Correlación de la concentración de licopeno y $\beta$ -caroteno con el contenido de materia seca de frutos maduros.....	63
	BIBLIOGRAFÍA .....	72

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla III.1 Lista de factores experimentales y niveles .....	21
Tabla III.2 Lista de tratamientos.....	21
Tabla III.3 Descriptores sensoriales utilizados en las sesiones por el panel de evaluadores.....	27
Tabla III.4 Definición e intervalos de los parámetros del modelo TOMGRO para el análisis de sensibilidad .....	29
Tabla IV.1 Medias y desviaciones estándar para pH, sólidos solubles y acidez total medidos en los 10 tratamientos para jitomates en estado maduro (medias de tres repeticiones) .....	37
Tabla IV.2 Medias y desviaciones estándar para los parámetros de color (L*, a*, b* y a*/b*) medidos en frutos obtenidos en cada uno de los 10 tratamientos (medias de dos repeticiones) ..	38
Tabla IV.3 Resultados del análisis de varianza ANOVA de una y dos vías para tratamiento (T), panelista (P) y su interacción (T × P) a partir de los datos de análisis sensorial .....	39
Tabla IV.5 Resumen de correlaciones y regresiones de los índices de color y el contenido de licopeno y β-caroteno en tomate .....	48
Tabla IV.6 Valores de los parámetros antes y después de la calibración mediante AGs .....	56
Tabla IV.7 Indicadores estadísticos para las cinco variables de estado del modelo TOMGRO antes y después de la calibración usando AGs para reducir el valor entre los datos observados y medidos .....	58
Tabla V.8 Concentración de licopeno y β-caroteno (ppm) durante las diferentes etapas de maduración.....	64
Tabla V.1 Tabla de unos. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1 Vista esquemática de una sesión de GC-O .....	19
Figura III.1 Variables de entrada del modelo TOMGRO medidas durante todo el ciclo de cultivo .....	23
Figura III.2 Dimensiones características de las hojas para la estimación del área foliar.....	25
Figura III.3 Diagrama del proceso de calibración del modelo TOMGRO (adaptado de Guzmán-Cruz et al., 2009).....	32
Figura IV.1 Efecto de las condiciones del clima y aplicaciones de AS en los atributos sensoriales de los frutos de tomate. Los valores representan el promedio de las intensidades de los descriptores (n=15). Las abreviaturas en la figura significan lo siguiente: Ov, aroma general; C, cítrico; F, fresco; HG, herbáceo verde; Fl, floral; S, dulce; Sa, salado; A, ácido; B, amargo; Vg, vegetativo; EH, dureza externa; FBH, dureza en la primer mordida; J, jugosidad; M, mealiness; and VA, resabio vegetativo. Los valores de la figura representan el promedio de 30 mediciones por tratamiento .....	40
Figura IV.2 Análisis de componentes principales (PCA) de los resultados de la evaluación sensorial del tomate en los diferentes tratamientos para aquellos descriptores de textura que mostraron diferencias significativas. a) PCA biplot, b) Gráfica de puntajes PCA y análisis HCA. ....	42
Figura IV.8 Regresión a) lineal y b) logarítmica del contenido de licopeno y $\beta$ -caroteno en diferentes etapas de maduración .....	47
Figura IV.9 Índices de sensibilidad global obtenidos mediante el método FAST para las variables de estado del modelo TOMGRO .....	52
Figura IV.10 Análisis de sensibilidad global estimados mediante el método de Sobol' para las variables de estado del modelo TOMGRO reducido.....	54
Figura IV.11 Datos medidos (línea punteada) y simulados (línea continua) antes de la calibración de parámetros para las 5 variables de estado .....	57
Figura IV.12 Datos medidos (línea punteada) y simulados (línea sólida) después de la calibración para las cinco variables de estado del modelo TOMGRO reducido.....	59
Figura IV.13 Gráfica del contenido de licopeno y $\beta$ -caroteno en las distintas etapas de maduración.....	64



Figura IV.14 Ajuste de las curvas de regresión para los datos de licopeno y $\beta$ -caroteno, el término REG indica los valores obtenidos mediante regresión .....	65
Figura IV.15 Datos medidos (línea punteada) y simulados (línea sólida) después de la calibración para el contenido de licopeno y $\beta$ -caroteno durante la maduración de los frutos de tomate .....	66
Figura IV.1 Título de figura.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura IV.2 Título de figura.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

# CAPÍTULO 1:

## I INTRODUCCIÓN

El interés de los consumidores a nivel mundial acerca de la calidad de los alimentos, en especial de los vegetales, ha aumentado en los últimos años. Definir la calidad de un producto es un tema complicado. Además de las características visuales, textura, contenido de vitaminas y minerales, las características sensoriales como sabor y aroma deben ser consideradas. Las nuevas tendencias muestran que los vegetales son apreciados por sus beneficios a la salud y subrayan la importancia de sus propiedades funcionales.

Muchos estudios han documentado métodos para lograr productos vegetales de alta calidad. El cultivo protegido de vegetales ofrece muchas ventajas comparado con la producción a cielo abierto, pero también el cultivo protegido llega a afectar la calidad interna del producto. Lo anterior se refleja en sabor y aroma diferentes comparados con los frutos cultivados en campo, provocado por cambios en las concentraciones de azúcares y ácidos, así como de otros metabolitos secundarios que son importantes para la nutrición y que son afectados por la dinámica del clima dentro del invernadero.

Debido a la fuerte influencia que tienen factores como cantidad y calidad de luz, temperatura, concentración de CO<sub>2</sub> e irrigación sobre la calidad de los cultivos es necesario establecer modelos matemáticos que permitan estimar el comportamiento del proceso de madurez del fruto en función de los parámetros antes mencionados con el fin de obtener un producto con características sensoriales acordes a las preferencias del mercado. Los vegetales obtenidos ofrecerán mejores características sensoriales, que sin duda, le permitirán colocarse dentro del mercado de las exportaciones y al mismo tiempo se aprovecharían todos los beneficios del cultivo en invernadero que permitan obtener mayores rendimientos de un fruto de calidad superior.

El estudio de la respuesta de los vegetales a los factores del clima en un cultivo protegido nos brinda el conocimiento para controlar la calidad a través de la manipulación de estos factores con el fin de obtener productos que mejoren la nutrición de los consumidores.

## **I.1 Antecedentes y Justificación**

### **I.1.1 El tomate**

El jitomate (*Lycopersicon esculentum*) es uno de los vegetales más cultivados en el mundo, es una planta diploide, perenne, autopolinizable y su popularidad entre los consumidores ha aumentado por su importante contenido de vitamina C y A. Anualmente, el tomate se cultiva en 3.99 millones de hectáreas alrededor del mundo y la producción total es de 108.5 millones de toneladas (Girish y Umesha, 2005). México es el tercer exportador más importante de jitomate en el mundo con cerca de seis millones de toneladas al año. Aproximadamente 3000 ha de terreno se destinan en México al cultivo en invernaderos, de las cuales el 70% corresponden al cultivo de jitomate, este sector crece a una tasa anual del 10% (INEGI, 2001).

El jitomate es un componente importante en la dieta de muchas regiones alrededor del mundo. Además de su apariencia externa, el sabor y aroma son criterios importantes para evaluar la calidad del jitomate. El cultivo de este fruto enfatiza la importancia en la producción, tamaño del fruto, ausencia de defectos y resistencia a enfermedades, mientras que sus cualidades sensoriales no siempre son tomadas en cuenta. Lo anterior ha resultado en cultivos con rendimientos elevados adaptados a la agricultura moderna, pero carentes de sabor y aroma agradables (Lisanti *et al.*, 2008).

Frecuentemente los consumidores muestran su inconformidad en relación con las características sensoriales del tomate fresco (Bruhn *et al.*, 1999), y aunque la investigación en aspectos agronómicos ha intentado mejorar su apariencia, vida de anaquel y resistencia a enfermedades, la calidad sensorial ha pasado a segundo término (Beltrán *et al.*, 2006). La calidad del tomate fresco depende de su estado de madurez, y entre los atributos más importantes que permiten definirla se encuentran: firmeza, contenido de sólidos solubles, pH, acidez (ácido cítrico y málico), concentración de licopeno, color, materia seca, contenido de azúcares reductores, atributos sensoriales como: consistencia, jugosidad, firmeza; sabores básicos y su resabio (Arvanitoyannis y Vaitisi, 2007). Una apropiada correlación entre las características fisicoquímicas y sensoriales permite a los productores decidir el estado de madurez más conveniente para el consumo en fresco o para procesamiento. La calidad de los frutos puede ser monitoreada a través de los distintos cambios que sufre el fruto durante el proceso de madurez, este proceso depende de factores ambientales y su efecto puede estimarse mediante la generación de modelos matemáticos.

### **I.1.2 Modelación matemática**

Un modelo matemático emplea algún tipo de formulismo matemático para estimar y cuantificar la interacción de procesos simultáneos (Ríos, 1995).

La aplicación de la modelación matemática consiste en el reemplazo del objeto cognitivo por su imagen matemática (modelo matemático) la cual, implementada en algoritmos lógico – numéricos en un ordenador, permite estudiar las cualidades del proceso original (Nuñez-Muñoz, 2000). La modelación permite tener una forma cuantitativa de la interacción de procesos simultáneos (López, 2006). El modelo de un cultivo es, el conjunto de relaciones matemáticas que describen los cambios de las variables de estado durante la ocurrencia de varios procesos, donde una variable de estado puede ser la biomasa (Goudrian y Van Laar, 1994; Overman, 1990; Overman, 1984).

Se han desarrollado varios modelos para cultivos dentro de los que destacan los de la escuela de *de Wit* que desde los 60's a la fecha han propuesto modelos como el SUCROS (Simple and Universal CROp growth Simulator) y LINTUL (Light INTerception and UtiLization) que son modelos genéricos (Bouman *et al.*, 1996). También se han desarrollado modelos para cultivos

como pepino, lechuga, pimiento y jitomate en éste último se pueden encontrar varios trabajos como el modelo TOMGRO (TOMato GROwth model), éste es un modelo con 69 variables de estado, el cual predice el desarrollo y producción (López *et al*, 2005). Los procesos de fotosíntesis y respiración se han utilizado para modelar algunos otros cultivos, por ejemplo, junto con el modelo TOMGRO se han usado para modelar la fotosíntesis de cultivos como tomate, pepino y pimiento (Nederhoff y Vegter, 1994).

## I.2 Planteamiento del problema

La información disponible muestra que los vegetales son muy apreciados por algunos de sus metabolitos secundarios considerados como componentes bioactivos tales como glucosinolatos, carotenoides, polifenoles, saponinas y terpenos. Estos compuestos no sólo están involucrados en mecanismos de defensa de la planta y en interacciones planta-insecto, sino que también tienen efectos benéficos en la salud. Se debe hacer énfasis en que ningún producto puede cubrir todos los requerimientos relacionados con estos compuestos pues su composición es dependiente del manejo agronómico, tiempo de cosecha, tipo de producto y procesamiento, entre otros factores, que determinan la calidad del producto tanto en fresco como procesado. Ahora bien, la calidad de los vegetales para consumo en fresco es un tema muy complejo, son muchas las características involucradas en la descripción de la calidad de un producto. Pero, los estándares de calidad (medidas objetivas) se basan la mayoría de las veces en cualidades externas (tamaño, forma, color, textura) y en la ausencia de desordenes fisiológicos y defectos, dejando a un lado otras propiedades como aroma, sabor y propiedades funcionales. Como consecuencia los cambios en estas últimas no son considerados y actualmente la demanda de estos parámetros por parte de los consumidores ha ido en aumento. Recientemente, muchos estudios han reportado la influencia de diferentes factores sobre la calidad de los vegetales. La tecnología en invernaderos permite controlar condiciones de luz (calidad y cantidad), temperatura, humedad, concentración de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O y disponibilidad de agua y otros nutrientes, es decir, los vegetales no están expuestos a los cambios bruscos en el clima del cultivo a campo abierto. La calidad de los tomates cultivados en invernadero ha sido descrita a detalle por Dorais *et al*. (2001), su cultivo en invernadero bajo un clima creado artificialmente permite aumentar su rendimiento y mejorar su

apariencia pero en frecuentemente afecta su calidad interna, en ocasiones alterando su sabor y aroma comparado con aquellos tomates obtenidos en campo.

### **I.3 Hipótesis y objetivos**

#### **I.3.1 Hipótesis general**

Estimar y simular la calidad del fruto del jitomate (*Solanum lycopersicon*) es posible a través de la modelación matemática basada en datos fisiológicos, sensoriales y fisicoquímicos que se ven afectados por los factores estado de madurez, radiación, temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> para obtener frutos con valor agregado.

#### **I.3.2 Objetivo general**

Establecer un modelo que permita relacionar el crecimiento del fruto del jitomate con el contenido de azúcares y licopeno en conjunto con el modelo TOMGRO reducido para estimar su calidad como producto de la interacción con factores ambientales de acuerdo a las necesidades de mercado y del consumidor de la región centro de México.

#### **I.3.3 Objetivos específicos**

Determinar experimentalmente el efecto de los factores radiación, temperatura, concentración de CO<sub>2</sub> sobre el crecimiento del jitomate en la región central del México

Analizar sensorial y fisicoquímicamente los tomates en diferentes niveles de maduración.

Identificar las variables que describan la calidad del fruto de tomate.

Generar relaciones cuantitativas que describan el comportamiento de dichas variables en función de los factores en estudio.

Establecer y calibrar el modelo matemático.

Realizar análisis de sensibilidad.

Validación del modelo matemático con datos de crecimiento en distintas condiciones ambientales

# CAPÍTULO 2:

## II REVISIÓN DE LITERATURA

Las frutas y verduras son las principales fuentes de vitaminas y otros compuestos funcionales para los humanos. En consecuencia, se deben consumir ciertas cantidades de ellos al día. Las frutas y verduras no pueden ser producidas en sus condiciones adecuadas durante todo el año. Sus periodos de consumo se limitan a un par de meses dependiendo de la temporada de cultivo y las condiciones ambientales. El cultivo protegido permite prolongar los periodos de cultivo durante todo el año e incrementar la producción así como mejorar rasgos de calidad importantes como contenido de ácido ascórbico, pH, materia seca, peso seco y color, que son variables muy importantes en el caso del tomate (Ece & Darakci, 2009).

Según los especialistas, cada vez es más fuerte el hecho de que nos encontramos al inicio de una escasez de recursos. Esta situación junto con la creciente demanda de alimentos y el deterioro de los terrenos para cultivo nos obliga a utilizar técnicas que permitan un uso más eficiente de recursos. Una buena opción ante la problemática mencionada es la producción de hortalizas en invernadero (Espinoza-Zapata, 2004).

El tomate (*Solanum lycopersicum* Mill.) está en constante demanda durante todo el año a nivel mundial. El cultivo comercial de tomate en invernadero se ha vuelto un negocio muy rentable aún en países con condiciones ambientales no aptas para el cultivo de hortalizas. Los invernaderos proveen protección contra factores bióticos y abióticos que permiten asegurar un producto de alta calidad (Singh, 2005).

La función de los invernaderos es la de modificar las condiciones del ambiente, de acuerdo a la etapa de desarrollo de las plantas, que permitan incrementar la producción y mejorar la calidad de los frutos. Sin embargo, producir en condiciones de invernadero es más costoso que producir en campo abierto ya que se trata de agricultura de precisión, basada en el control de las variables del ambiente en el invernadero en respuesta a las

necesidades de la planta. El mejoramiento de la calidad y apariencia de los frutos es la base para el éxito en la producción de tomates frescos en invernadero. La calidad y la apariencia de los frutos de tomate están determinadas por distintos factores ambientales y genéticos, en los cuales la nutrición tiene un papel muy importante. El nitrógeno, fósforo y potasio son factores clave en el control del desarrollo de frutos y su maduración (Marschner, 1995).

Al hablar de agricultura de precisión los modelos matemáticos de hortalizas permiten probar hipótesis científicas sobre las posibles respuestas de un cultivo ante distintas condiciones ambientales y de nutrición (López-Cruz *et al.*, 2005). La mayoría de modelos matemáticos consideran que el crecimiento y desarrollo dependen de variables ambientales tales como radiación, temperatura, concentración de CO<sub>2</sub>, y las características genéticas de la planta. El desarrollo de un modelo matemático requiere suficiente comprensión de los procesos biológicos, fisiológicos, químicos y físicos de un sistema biológico. El uso de los modelos demanda análisis, ajuste y corroborar su capacidad de predicción (Thornley & Johnson, 2000; Goudriaan & Laar, 1994). Los modelos de hortalizas más estudiadas han tenido la finalidad de sintetizar el conocimiento del sistema e incrementarlo y aplicar los modelos en estudios de control óptimo, sin embargo, son pocos los modelos aplicados en estudios de calidad de los frutos que permitan, mediante agricultura de precisión, mejorar atributos como el sabor y aroma con la finalidad de una mayor aceptación por parte del consumidor.

## **II.1 Calidad**

### **II.1.1 Calidad de los productos hortícolas**

El término “calidad” puede ser definido de muchas maneras, esto significa que agricultores, productores, vendedores y consumidores tendrán diferentes puntos de vista sobre la calidad en base a su percepción y experiencia. Lo anterior se refleja en los distintos factores de calidad que se toman en cuenta para un determinado producto. Las variables de calidad comúnmente asociados a vegetales son: forma, color, sabor, textura, firmeza, carga microbiana y contenido de nutrientes. Las características de calidad mencionadas pueden clasificarse en cuatro grupos: físicos, químicos, microbiológicos y nutricionales (Sablani, 2006). También son importantes el contenido de sólidos totales, acidez, contenido de fibra,



además de una gran variedad de compuestos denominados metabolitos secundarios con propiedades benéficas para la salud humana como es el caso de glucosinolatos, carotenoides, polifenoles, saponinas y terpenos (Herrmann, 2001). Estas características son importantes tanto para productos en fresco como procesados (Cuartero y Fernández-Muñoz, 1999) y pueden afectar negativamente la aceptación de los productos por parte del consumidor (Sablani, 2006).

Existen diferentes puntos de vista concernientes a la calidad de frutos y vegetales, la calidad es función tanto del tipo de producto final (fresco o procesado) como de los criterios de aceptación por parte del consumidor, en el caso de un producto, los atributos que definen su calidad pueden ser cuantificados, mientras que los criterios del consumidor para definir la calidad de un producto están orientados hacia su satisfacción, un concepto abstracto y por tanto difícil de cuantificar. Las metodologías para el control de calidad deben ser capaces de establecer que características le proporcionan un valor agregado al producto al mismo tiempo de que satisfacen las exigencias del consumidor (Dris y Jain, 2004).

Se han establecido criterios objetivos para definir la calidad de frutas y vegetales basados en el Codex Alimentarius de la FAO y de la Organización Mundial de la Salud (WHO). Estos estándares de calidad son medidas objetivas de la calidad basados en cualidades externas como forma, tamaño, color (Kays, 1999), las cuales no son fijas sino que son atributos dinámicos que cambian de acuerdo al proceso de madurez. Para el caso específico del jitomate las características de calidad más importantes son: pH, contenido de sólidos solubles, conductividad eléctrica, contenido de glucosa, acidez titulable y materia seca (Chapagain, 2003). Otro criterio importante, que define la calidad de los productos agrícolas, es la inocuidad. Este término se refiere a la cualidad de no causar daño, es decir, que no estén asociados a riesgos que puedan afectar la salud de los consumidores, los cuales pueden ser introducidos tanto en la producción primaria como en los procesos de transformación (Torrado, 2002).

Actualmente existe una gran preocupación por la baja calidad percibida por parte de los consumidores en tomates cultivados en invernadero. Lo anterior es influido de manera importante por la creación de nuevas variedades y por el grado de madurez en el que se cosechan los frutos. Además, en las empacadoras comúnmente se exponen los frutos a un tratamiento adicional con etileno con la finalidad de acelerar el proceso de maduración, lo cual conlleva a efectos negativos en el sabor y aroma de los frutos (Mikkelsen, 2005).

Aunque el cultivar es probablemente el factor más importante que afecta la calidad de los productos procesados de tomate, existen otros factores como la madurez, sitio de cultivo y clima, y condiciones de procesamiento. El contenido de materia seca de los tomates se encuentra entre un 5 a 10%. En tomates maduros tres cuartos de la materia seca está constituida por sólidos, principalmente azúcares (50%), ácidos orgánicos (>10%), minerales (8%) y pectina (7%) (Davies & Hobson, 1981). Estos componentes contribuyen con el sabor, aroma, color y textura de los tomates y sus derivados. El sabor del tomate es resultado de un balance adecuado en el contenido de azúcares y ácidos. Conforme los tomates maduran hay un incremento en azúcares y una disminución de ácidos. En tomates maduros, la acidez es consecuencia de la presencia de ácido cítrico, seguido por el ácido málico (García & Barret, 2005). El color es considerado otro atributo importante en la calidad de los tomates y se relaciona principalmente con el contenido de licopeno. El contenido de licopeno y vitaminas es una medida útil de la calidad funcional del tomate, el contenido de compuestos volátiles, azúcares solubles y ácidos orgánicos permite estimar su calidad nutricional (Di Cesare *et al.*, 2010) Evaluar la calidad de los tomates no es una tarea simple. La intensidad del sabor y aroma de los frutos es determinada en gran medida por la cantidad de azúcares (fructosa, glucosa y trazas de sacarosa), ácidos orgánicos (cítrico, málico y oxálico) y la concentración de compuestos volátiles (neral, geranial, nerilacetona, hexanal, 3(Z)-hexen-1-ol,  $\beta$ -ionona,  $\alpha$ -terpineol, 6-metil-5-hepten-1-ol, etc.) (Di Cesare *et al.*, 2003; Silvestri & Siviero, 1991). La calidad organoléptica involucra sabor, aroma, así como el color y la textura del fruto. Lo anterior puede evaluarse por mediciones instrumentales o mediante análisis sensorial, esta última es la manera más eficiente de describir características organolépticas. El sabor y aroma del tomate no sólo es influido por la variedad y el régimen nutricional de la planta (Petersen *et al.*, 1998), sino también por la etapa de maduración al momento de la cosecha y por

las condiciones de almacenamiento post-cosecha (Ratanachinakorn *et al.*, 1997; Kader *et al.*, 1978).

La textura es otro de los atributos más críticos para la aceptación y evaluación de la calidad del tomate por parte del consumidor (Serrano-Megias & Lopez-Nicolas, 2006; Causse *et al.*, 2003). Son muchos los factores involucrados en la textura de frutos, entre los que destacan los atributos sensoriales como firmeza, jugosidad y textura crujiente (Szczesniak, 2002). Los cambios más importantes en cuanto a textura ocurren durante el proceso de maduración, principalmente asociadas con el ablandamiento, el cual, influye en el comportamiento post-cosecha del fruto (transporte, almacenamiento, vida de anaquel y resistencia a patógenos). El ablandamiento se asocia con una pérdida de rigidez y adhesión en la pared celular, como consecuencia de la acción de enzimas hidrolasas. La relación entre la acción de estas enzimas y las propiedades reológicas del fruto aún no es clara (Brumell & Harpster, 2001). Generalmente se realizan ensayos instrumentales para evaluar propiedades mecánicas relacionadas con la firmeza en tejidos vegetales. La prueba de firmeza más utilizada es la de Magness-Taylor, la cual permite evaluar la máxima fuerza necesaria para comprimir una muestra (Abbott, 2004). Este sistema fue desarrollado para evaluar la calidad de los frutos respecto a la evaluación táctil que realizan los consumidores al momento de comprar los tomates. Existen otros tipos de mediciones mecánicas destructivas y no destructivas, incluyendo compresión, tensión y vibración. Los ensayos reológicos proporcionan información sobre las propiedades mecánicas en el fruto o en ciertas partes (pericarpio). El análisis sensorial proporciona información complementaria sobre percepción humana de varios atributos de calidad de los frutos que serían difíciles de medir instrumentalmente (Seymour *et al.*, 2002). Con el fin de mejorar nuestra comprensión sobre eventos biofísicos y bioquímicos relacionados con los cambios en rasgos de calidad, es esencial caracterizar estos rasgos a diferentes escalas (reológica, sensorial, morfológica y matemática).

El sabor es otro atributo importante para definir la calidad de un fruto, es bastante complejo de definir y es afectado por componentes tanto genéticos como no genéticos, los cuales no son completamente comprendidos (Goff & Klee, 2006). Una compleja mezcla de azúcares, ácidos, aminoácidos, minerales y compuestos volátiles contribuye con el aroma y sabor característicos del tomate fresco. Las concentraciones de estas moléculas pueden afectar de manera significativa la aceptación del sabor y aroma por parte del consumidor (Carli *et al.*, 2009).

El color del tomate se debe a la presencia de diversos carotenoides, cuya aparición está condicionada a regulación ambiental y genética conforme el fruto madura, es un factor muy importante que afecta la aceptación por parte de los consumidores y también es un atributo de calidad para la industria de los productos derivados del tomate (Vazquez-Cruz et al., 2010). Entre los carotenoides más importantes producidos por el tomate destacan el licopeno y el  $\beta$ -caroteno, considerados como compuestos antioxidantes importantes que incrementan las características funcionales del tomate al prevenir enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer (Bunghuez et al., 2011; Giovanucci, 2005). Tanto la clorofila como los carotenoides son responsables del color del tomate. En etapas tempranas de maduración la clorofila imparte un color verde al tomate, cuando el jitomate empieza a madurar la clorofila se degrada y los carotenoides comienzan a sintetizarse (Venkata-Rao y Ravi-Kiran, 2011). Los dos principales carotenoides son el licopeno, el cual es responsable del color rojo del tomate y es el que se produce en mayor cantidad; y el  $\beta$ -caroteno, que representa cerca del 7% del contenido total de carotenoides presenta actividad como precursor de la vitamina A (Arias et al., 2000). De acuerdo con Sharma y Maguer (1996) la mayor parte del licopeno se encuentra en la fracción insoluble del pericarpio del tomate. Se ha encontrado que el contenido de carotenoides en el tomate depende de factores genéticos y ambientales como radiación, temperatura y concentración de CO<sub>2</sub>, así como de la etapa de maduración del fruto por eso es importante generar correlaciones entre el contenido de carotenoides y las fluctuaciones en las condiciones ambientales así como con otros parámetros del fruto como el color medido con un espectrofotómetro (Monataña-Cámara et al., 2010; Fraser et al., 2007).

### **II.1.2 Cuantificación de carotenoides y otros compuestos en tomate**

Aunque el licopeno es el carotenoide más abundante en el tomate, la presencia de una amplia variedad de otros carotenoides en este fruto no puede pasarse por alto. Es por esto que el licopeno en combinación con otros compuestos pueden ser responsables de la actividad biológica y funcional del tomate (Kachiik et al., 2002). Actualmente existen muchas técnicas para la cuantificación de carotenoides en frutos y en productos relacionados. Olives-Barba et al., (2006) optimizó y comparó la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) con un método

espectrofotométrico para la determinación de licopeno y  $\beta$ -caroteno en vegetales. El método HPLC mostró mejor precisión y sensibilidad para la cuantificación del licopeno, siendo más específico que la espectrofotetría. La técnica de HPLC permite una separación y cuantificación precisa de los carotenoides y sus isómeros presentes en tomate y provee una mejor cuantificación de sus concentraciones. Un factor importante que es necesario tomar en cuenta es el efecto del solvente que se usará para la extracción de los carotenoides y es importante comparar la eficiencia de varios sistemas muestra-solvente (Lin y Chen, 2003). Se han reportado muchas condiciones diferentes para la extracción de carotenoides con diferencias importantes entre cada uno de los autores. Los carotenoides pueden ser extraídos de los tomates usando diferentes solventes, combinaciones de solventes y relaciones soluto:solvente, cada una con diferentes eficiencias de extracción. El análisis de carotenoides se ha llevado a cabo comúnmente por HPLC en columnas  $C_{18}$  o  $C_{30}$  bajo un gradiente de elución seguido por un detector de absorbancia UV con buena reproducibilidad y una adecuada sensibilidad (Dias et al., 2007). También se ha recurrido al uso de espectrometría de masas (MS) para la detección de carotenoides para superar las limitaciones de interferencias causadas por sustancias co-eluidas, otras técnicas como bombardeo atómico, ionización por electrospray y ionización química a altas presiones también han sido utilizadas (Ishida et al., 2001). El método que se seleccione debe tomar también en cuenta las interacciones de los compuestos químicos con la matriz en la que se encuentran, debe ser corto y reproducible. Por lo regular la etapa de extracción es la principal fuente de variación en cualquier método de extracción y cuantificación que se utilice (más del 60% de la SD) (Lucini et al., 2011).

### **II.1.3 Producción de vegetales en invernadero**

El uso de invernaderos se ha expandido a muchas partes del mundo (Enoch y Enoch, 1999), en particular en la costa del Mediterráneo y el sureste de España se presenta una cantidad importante de invernaderos con aproximadamente 37,500 ha dedicadas principalmente al cultivo intensivo de vegetales (Castilla y Hernández, 2005). La mayoría de los invernaderos constan de estructuras de bajo costo cubiertas con películas de plástico, carentes de sistemas para el control del ambiente interno (Pérez-Parra et al., 2004). El uso de esta tecnología para la construcción de

invernaderos se ha extendido a muchos otros países como Sudáfrica y Marruecos durante la última década, y representa el prototipo de invernaderos de bajo costo (Pardossi et al., 2004). Comúnmente, el ambiente artificial generado dentro de un invernadero es el adecuado para el crecimiento de los cultivos comparado con el cultivo en campo (Huaiying *et al.*, 2006). Actualmente se cuenta con invernaderos mejor equipados que permiten mejores condiciones de microclima dentro de ellos para incrementar la calidad de los productos (Castilla *et al.*, 2004).

Los cultivos producidos en invernadero incluyen tomates, pepinos, pimientos y lechuga, sin embargo, bajo condiciones de invernadero la calidad de los frutos suele ser menor que aquellos frutos cultivados en campo, por lo que la aceptación por parte del consumidor se ve afectada.

## **II.2 Influencia de nutrientes y factores ambientales sobre la calidad y desarrollo de frutos**

El tomate exhibe una rápida respuesta a las variaciones en las técnicas de producción a las que es sometido. El tamaño, producción por planta y precocidad incrementan cuando se incrementa la superficie de suelo por planta (Gunay, 1981). Cuando se cultiva tomate, la aplicación del fertilizante es importante para incrementar la producción y tamaño de los frutos y para mejorar la calidad nutricional y funcional de los frutos de tomate. El metabolismo del nitrógeno está directamente relacionado con el potencial de producción de las hortalizas. Se requiere una gran cantidad de nitrógeno (N) para una óptima producción, sin embargo, la deficiencia de este macronutriente puede causar disminución en el número y tamaño de frutos, así como reducción en la vida de anaquel, pérdida de color, sabor y aroma (Sainju *et al.*, 2003). Algunos investigadores han concluido que para obtener rendimientos altos de tomates, las concentraciones óptimas de  $\text{NH}_4\text{-N}$  para cultivo hidropónico deben ser de alrededor de 25 a 30% del total de nitrógeno en solución (Hartman et al., 1986). Un déficit de nitrógeno trae como consecuencia paredes celulares delgadas, tallos débiles y una insuficiente producción de biomasa.

El potasio (K), calcio (Ca) y boro (B) son elementos nutricionales clave en el control del desarrollo y maduración del fruto (Marschner, 1995). La fertirrigación con K y nitrógeno (N) es

una práctica común en la producción comercial para proveer un suministro constante de nutrientes a fin de evitar deficiencias que causen desordenes fisiológicos como la mancha dorada en frutos de tomate (Huang & Snapp, 2009). El nivel de K tiene una marcada influencia sobre la actividad fotosintética y en consecuencia sobre la acumulación de carbohidratos y ácidos orgánicos que promueven el crecimiento y funcionamiento de la planta (Tapia & Gutiérrez, 1997).

El K es un nutriente esencial para las plantas, actúa durante la estabilización del pH, osmorregulación, activación de las enzimas y en procesos de transporte a través de la membrana. El tomate absorbe K en cantidades mayores que cualquier otro nutriente (Chapagain *et al.*, 2003). El establecimiento de relaciones N/K adecuadas para las distintas fases de desarrollo aparece como uno de los problemas fundamentales que, desde el punto de vista nutricional, inciden en la productividad y calidad de la cosecha para el cultivo protegido de tomate. Esta relación de N/K determina el equilibrio entre los procesos de crecimiento y fructificación, adecuada partición de la biomasa vegetal y una mayor eficiencia del proceso fotosintético (Hernández *et al.*, 2009). Si bien el K no juega un papel importante en la composición de los elementos estructurales, si lo hace en el transporte de azúcares, por ello aumenta la capacidad de la planta para acumular biomasa en sus órganos y especialmente en los frutos. Se ha comprobado que el flujo de carbohidratos en el floema es más intenso en plantas que reciben una adecuada fertilización con K (Neudes, 2003). De acuerdo con Sima *et al.* (2010), tanto el contenido de azúcares como la acidez aumentan en el caso de la fertilización foliar y en sustrato orgánico como respuesta a una mayor tasa de K aplicado vía foliar y a un mejor manejo de la nutrición.

Los consumidores demandan alimentos con alta calidad nutritiva, y además sabor, aroma, textura y color satisfactorios con un mínimo de conservadores (Bull *et al.*, 2004). El valor nutricional del tomate se debe a los efectos benéficos para la salud de algunos de sus constituyentes (vitaminas, fibra, carotenoides) los cuales en general, ayudan a inhibir el proceso de estrés oxidativo y, en particular, ayudan a prevenir algunos tipos de cáncer y enfermedades cardiovasculares (Rao & Agarwal, 2000). La concentración de metabolitos secundarios como licopeno,  $\beta$ -caroteno, compuestos fenólicos y flavonoles se incrementa bajo condiciones de deficiencia de nitrógeno (Dorais *et al.*, 2008). En cuanto a calidad nutricional y factibilidad para el procesamiento, algunos autores han subrayado los efectos negativos del exceso de nitrógeno,

tales como incrementos de pH y disminución de azúcares solubles, sólidos solubles, materia seca, y firmeza (Parisi *et al.*, 2006). Yu-Tao *et al.* (2007) estudiaron el efecto de distintos niveles de nitrógeno sobre la composición de compuestos volátiles. Aumentando la cantidad de nitrógeno aplicado se incrementó la concentración de 1-penten-3-ona, hexanal, 3(Z)-hexenal, 2-metil-4-pental, 2(E)-hexenal, así como sólidos y azúcares solubles.

El fósforo es un componente importante en el metabolismo y regulación de muchas rutas involucradas en la biosíntesis de metabolitos secundarios, muchos de los cuales son compuestos funcionales. El fósforo puede incrementar los niveles de algunos fitoquímicos como el ácido ascórbico, antocianinas, flavonoides y licopeno, aunque también puede haber efecto de la temporada de cosecha y de factores climáticos (Bruulsema *et al.*, 2004). Saito and Kano (1970) encontraron que incrementando el contenido de P entre 0 y 100 mg/L en la solución nutritiva, se incrementaba el contenido de licopeno y, por lo tanto, se favorecía de manera importante el color de los frutos. Oke *et al.* (2005) estudiaron el efecto del fósforo sobre la calidad del tomate cultivado a cielo abierto durante tres años consecutivos, evaluando, pH, acidez titulable, contenido de licopeno, vitamina C, compuestos volátiles, etc. Ellos notaron que la influencia del contenido de fósforo en muchas de las variables de calidad antes mencionadas fue mínima, mientras que las variables climáticas tuvieron un efecto más importante.

La calidad, tanto interna como externa, de las hortalizas se convertido en uno de los factores más importantes para su consumo. Uno de los factores que determina la calidad de los frutos es la disponibilidad de potasio para las plantas. La función más importante del potasio en el metabolismo vegetal es la activación de enzimas y el balance interno de agua. La acumulación de carbohidratos y ácidos orgánicos es altamente dependiente de una tasa adecuada de fotosíntesis, la intensidad de esta se relaciona con el nivel de K en la planta. La combinación de potasio y nitrato aporta grandes beneficios al mejorar el tamaño del fruto, contenido de materia seca, color, sabor y aumenta la resistencia (Achilea, 1999). El efecto del potasio sobre la producción de tomates en invernadero fue estudiada por Ozgun *et al.* (1974), ellos reportaron que un contenido alto de potasio induce una alta producción de licopeno. El desarrollo de color en tomate durante su maduración se debe principalmente a la síntesis de carotenoides, particularmente licopeno. La incidencia en la aparición de manchas internas y externas durante la maduración del tomate es un



desorden común y puede disminuirse al aumentar la dosis de potasio alrededor de 205 kg/ha (Hartz *et al.*, 2001; Olson *et al.*, 2004).

Dentro de los factores ambientales la temperatura, concentración de CO<sub>2</sub> y la cantidad de luz son las variables cuyo efecto ha sido ampliamente estudiado. La temperatura influye el desarrollo de la raíz, así como la absorción de agua y de iones esenciales (Jones, 1997). Bajas temperaturas reducen la absorción de nutrientes por la planta. La temperatura también tiene un efecto considerable sobre el tiempo de maduración. La sensibilidad de los frutos a la temperatura aumenta en frutos maduros (Adams *et al.*, 2001) debido a un incremento en la tasa de respiración en función de la temperatura. Este efecto es una consecuencia de la sensibilidad térmica de enzimas que catalizan reacciones involucradas en la respiración (Lampers *et al.*, 1998). Por otra parte, a bajas temperaturas algunas plantas pueden crecer poco o dañarse. En parte, tal daño está asociado con el aparato fotosintético y en consecuencia se afecta el balance de carbón en la planta. Existe evidencia de que durante el invierno, en plantas de tomate, la movilidad de los nutrientes a través de la planta disminuye, acumulándose en su mayoría en las raíces y disminuye en el tallo (Darawsheh & Bouranis, 2006).

La luz es un factor importante para el crecimiento de las plantas, conduce la captación de carbono durante la fotosíntesis. La intercepción de luz (LI) y la eficiencia en el uso de luz (LUE) caracterizan la captación de recursos y la eficiencia en su utilización en sistemas de cultivo, incluyendo cultivos intercalados. En cultivos de campo abierto, existe regularmente una relación lineal entre la PAR interceptada y la biomasa acumulada. La pendiente de esta relación se denomina LUE (Russell *et al.*, 1989). Una mejora en la productividad puede resultar de una mayor intercepción de la radiación solar, una LUE más alta, o de la combinación de ambas (Willey, 1990). Zhang *et al.* (2008) resaltan que la alta productividad en cultivos intercalados, comparada con monocultivos, puede ser ampliamente explicada por un incremento en la intercepción acumulada de luz por unidad de área cultivada. Sin embargo, en un estudio bajo condiciones experimentales, Riga *et al.* (2008) encontraron que la calidad del tomate es más dependiente de la temperatura que de la PAR, estos resultados sugieren que los agricultores pueden obtener tomates de calidad similar bajo una PAR baja en comparación con la luz natural. Existe una relación positiva entre el contenido de ácido ascórbico y la cantidad de luz que recibe la planta de tomate. El método de producción, la fertilización, clima y condiciones de suelo

también afectan el contenido de ácido ascórbico en el fruto de tomate. El contenido de ácido ascórbico en tomate varía entre 12 y 35.7 mg/100g (Ece & Darakci, 2009).

### **II.2.1 Evaluación sensorial de la calidad de productos hortícolas**

La caracterización de un alimento es un proceso largo y complejo que normalmente involucra a varias disciplinas científicas. El análisis sensorial es una de ellas y, concretamente, la obtención del perfil descriptivo o “huella sensorial” del producto es una parte fundamental de esa caracterización. Definir que características son importantes sensorialmente no es una tarea fácil, esto se debe a que cada consumidor tiene diferentes puntos vista y suelen dar apreciaciones relativas comparando unos productos con otros (Marsili, 2006).

El análisis sensorial se ha definido como una disciplina científica usada para medir, analizar e interpretar las reacciones percibidas por los sentidos de las personas hacia ciertas características de un alimento como son sabor, aroma, color y textura, por lo que el resultado de este conjunto de sensaciones captadas es usado para medir la calidad de los alimentos (Marsili, 2006; Cuartero y Fernández-Muñoz, 1999). Un método diseñado para este propósito es el método Spectrum®, cuyo objetivo es establecer todo el programa de evaluación sensorial, los objetivos específicos del proyecto para desarrollar el panel de catadores y el nivel deseado de confiabilidad para el tratamiento estadístico de los datos (Meilgaard, 2007).

El método requiere que los panelistas sean entrenados para desarrollar la terminología que permita describir los productos. En un principio los panelistas desarrollan sus propios descriptores evaluando una amplia variedad de productos (marcas comerciales) para definir una categoría. Después todos los términos de los panelistas son organizados en una lista para elegir la mejor opción que defina cada atributo evaluado y que sea entendido de la misma manera por todos los panelistas, a su vez este método emplea una escala de intensidades de 1 a 15 que se asigna a cada descriptor de acuerdo a la apreciación de los panelistas (Meilgaard, 2007).

## II.2.2 Olfatometría (Cromatografía de gases-espectrometría de masas)

Para definir un aroma, es importante conocer que compuestos químicos contribuyen a la mezcla de aromas y como se percibe o detecta cada uno de manera individual. En los inicios del estudio del aroma, se realizaron investigaciones analíticas asumiendo que todos los volátiles encontrados en los alimentos contribuían con su aroma. Para 1974 se habían identificado más de 2600 sustancias odoríficas en los alimentos, aunque no todos estos compuestos contribuían con la generación de aromas (Rijkens y Boelens, 1975). Esto llevó a los investigadores a calcular valores de actividad odorífica (OAV) de los compuestos que relacionan la concentración del compuesto en cierto material con su umbral de detección (Rothe y Thomas, 1963).

Existen pocos compuestos con carácter de impacto, que por sí solos constituyen el aroma de un alimento, este hecho fue la razón del cambio en las metodologías de estudio de los aromas. A partir de 1984, cuando se publicó la metodología para el análisis CHARM (Acree *et al.*, 1984), se desarrollaron técnicas que se enfocaban en la identificación de compuestos con valores OAV altos que en verdad contribuían con el aroma. Estos nuevos métodos fueron exitosos en la medida que los resultados permitían la preparación de mezclas sintéticas. Los resultados permitieron llegar a la conclusión de que <5% de los compuestos volátiles identificados en los alimentos contribuían con el aroma (Grosch, 2001).

Las concentraciones de los compuestos aromáticos de los alimentos son usualmente muy bajas, esto hace que su estudio sea todo un reto. Aunque no es suficiente medir solo las concentraciones a las cuales se encuentran los compuestos, la actividad aromática y los umbrales de detección de los compuestos también deben ser medidos (Landy *et al.*, 1996).

Cuando los alimentos se cocinan, almacenan o ingieren, los compuestos presentes en ellos están propensos a sufrir reacciones químicas que pueden alterar sus propiedades sensoriales (Fisher y Scott, 1997). Los compuestos aromáticos pueden interactuar con otros compuestos que tal vez provoquen el incremento o inhibición de la sensación de aroma que posean dichos compuestos. Además, la liberación de compuestos aromáticos es un proceso afectado por las interacciones con algunas macromoléculas (lípidos, proteínas, carbohidratos) presentes en los alimentos, así como por variaciones en la temperatura y pH, todas estas condiciones deben tomarse en cuenta

durante cada una de las etapas involucradas en el estudio del aroma (Miettinen, 2004). El análisis instrumental de un alimento consiste de dos fases: caracterización molecular y caracterización biológica que se engloban en una técnica denominada olfatometría.

Cuando los compuestos odoríficos eluyen de la columna del GC, pueden ser detectados por instrumentos como el detector de ionización de flama (FID) o por un detector selectivo de masas (MSD). Aunque estos instrumentos permiten la cuantificación de los compuestos, la concentración en la cual se encuentran no se puede relacionar directamente con la intensidad del aroma que producen. Una mejor estimación de su actividad aromática se obtiene mediante el análisis sensorial de cada componente. Lo anterior se logra utilizando panelistas o jueces entrenados que evalúen el efluente para detectar y caracterizar los compuestos químicos (Dravnieks y O'Donnell, 1971). Como resultado se obtiene un aromagrama en el cual los olores percibidos son indicados en función del tiempo y la intensidad (Acree, 1994). La detección química y la identificación de los compuestos volátiles mediante FID/MSD se combina con los resultados de las evaluaciones hechas por los panelistas sobre una misma escala de tiempo (Fig. 1). Debido a que los panelistas tienden a ser un tanto inconsistentes en sus resultados las sesiones deben repetirse varias veces para promediar los resultados y así evaluar la actividad odorífica de cada compuesto.

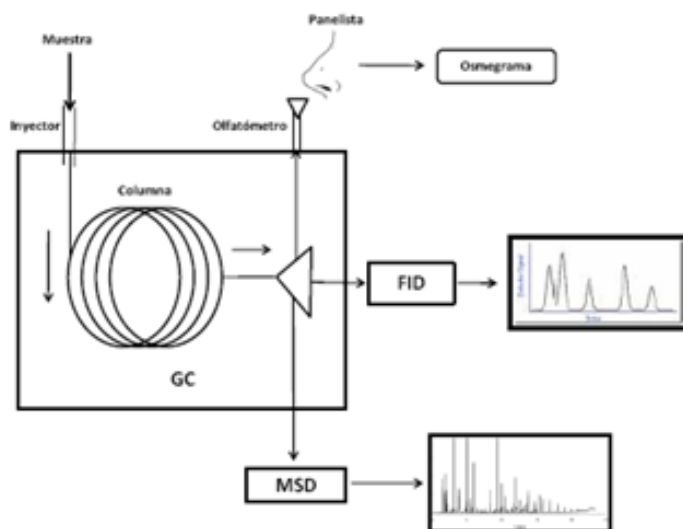


Figura II.1 Vista esquemática de una sesión de GC-O

# CAPÍTULO 3:

## III METODOLOGÍA

### III.1 Marco teórico

Los métodos actuales para la producción de frutos y vegetales de calidad superior involucran estrategias en constante cambio que incorporen el conocimiento de ciencias de la producción, calidad alimentaria, valor nutricional y beneficios a la salud (alimento funcional). Dichos métodos para la producción de vegetales y frutos se basan únicamente en obtener el máximo volumen de producción o peso del fruto sin considerar aspectos importantes de calidad. En años recientes hay un considerable interés en incrementar la producción y rendimientos así como la calidad nutricional de frutos y vegetales.

### III.2 Metodología

**Material Vegetal:** Se utilizaron semillas de jitomate Roma var. Rafaello. En total se germinaron 1200 semillas en una mezcla de peat moss:vermiculita:perlita como sustrato en relación 2:1:1. El trasplante se realizó cuando las plántulas desarrollaron dos hojas verdaderas, el sustrato fue tezontle cribado con una densidad aparente de  $0.605 \text{ mg/m}^3$ . El tezontle se colocó en macetas de 5 L. El experimento se llevó a cabo en el invernadero de la Facultad de Ingeniería, con un área de  $1012 \text{ m}^2$ , las plántulas se dispusieron en 16 filas con 1.5 m de separación entre filas y 0.5 m de separación entre plántulas, la densidad fue de  $0.97 \text{ plantas/m}^2$ . Se colocó una cobertura plástica en el invernadero para evitar el desarrollo de malezas.

**Diseño experimental:** En este experimento se utilizó un diseño factorial incompleto (Turrent and Laird, 1985). Los factores para los tratamientos fueron concentración de  $\text{CO}_2$ , radiación fotosintéticamente activa (PAR), temperatura y concentración de ácido salicílico (AS) (Tabla 1). Un total de 10 tratamientos resultaron de la combinación de estos factores, sólo el ácido salicílico fue evaluado en cuatro niveles, los demás factores se evaluaron en 3 niveles cada uno (Tabla 2).

**Tabla III.1 Lista de factores experimentales y niveles**

<b>Factor</b>	<b>Nivel</b>			
CO <sub>2</sub>	400 ppm	550 ppm	1100 ppm	-
Temperatura	25 °C	33 °C	40 °C	-
Radiación	73.78 uM/m <sup>2</sup> s	221.35 uM/m <sup>2</sup> s	295.14 uM/m <sup>2</sup> s	-
Ácido salicílico	0 μM	0.01 μM	0.1 μM	1 μM

El experimento se llevó a cabo en un diseño de bloques completamente al azar con tres repeticiones. Además se realizó el monitoreo de variables climáticas diariamente durante todo el experimento (desde etapa de plántula hasta etapa de fructificación) con una estación de monitoreo Watch-Dog® Datalogger.

**Tabla III.2 Lista de tratamientos**

<b>Tratamiento</b>	<b>CO<sub>2</sub> (ppm)</b>	<b>SA (μM)</b>	<b>Radiación (uM/m<sup>2</sup>s)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>T1</b>	550	0.01	295.14	33
<b>T2</b>	550	0.1	295.14	33
<b>T3</b>	550	0	295.14	33
<b>T4</b>	550	1.0	295.14	33
<b>RH</b>	550	0.1	221.35	33
<b>TH</b>	550	0.1	295.14	40
<b>RL</b>	550	0.1	73.78	33
<b>TL</b>	550	0.1	295.14	25
<b>COH</b>	1100	0.1	295.14	33
<b>COL</b>	400	0.1	295.14	33

### III.2.1 Muestras de tomate

Las muestras consistieron en tomates frescos de cada uno de los tratamientos evaluados, fueron cosechados a partir del 6 de Noviembre del 2011 en 6 diferentes etapas de maduración de acuerdo con la carta de color de la USDA (USDA color chart, 1991), las etapas fueron: 1) verde, 2) rompiente, 3) transición, 4) rosa, 5) rojo ligero y 6) rojo. Todas las muestras fueron almacenadas a 4°C antes de transportarse al Instituto Tecnológico de Celaya (Celaya, Guanajuato, México) para los análisis fisicoquímicos y sensoriales, y se colocaron a temperatura

ambiente una noche antes de cada evaluación. Para los análisis se seleccionaron lotes de jitomates con características homogéneas de color y forma.

### III.2.2 Pruebas fisicoquímicas

Las pruebas fisicoquímicas se llevaron a cabo en submuestras de 20 g de fruto de cada tratamiento; todos los análisis fisicoquímicos se realizaron por duplicado. Los análisis consistieron en pH, °Brix, acidez titulable, sólidos solubles totales (SST), contenido de clorofila y análisis colorimétricos. El color fue medido con un espectrofotómetro Minolta CM-2002 (Konica Minolta, Tokio, Japón) y fue expresado como L\* (luminosidad), a\* (verde a rojo) y b\* (azul a amarillo). El color fue medido en dos posiciones diferentes sobre el ecuador del fruto y el promedio fue utilizado para los análisis. El cambio de color en la superficie de los jitomates fue calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

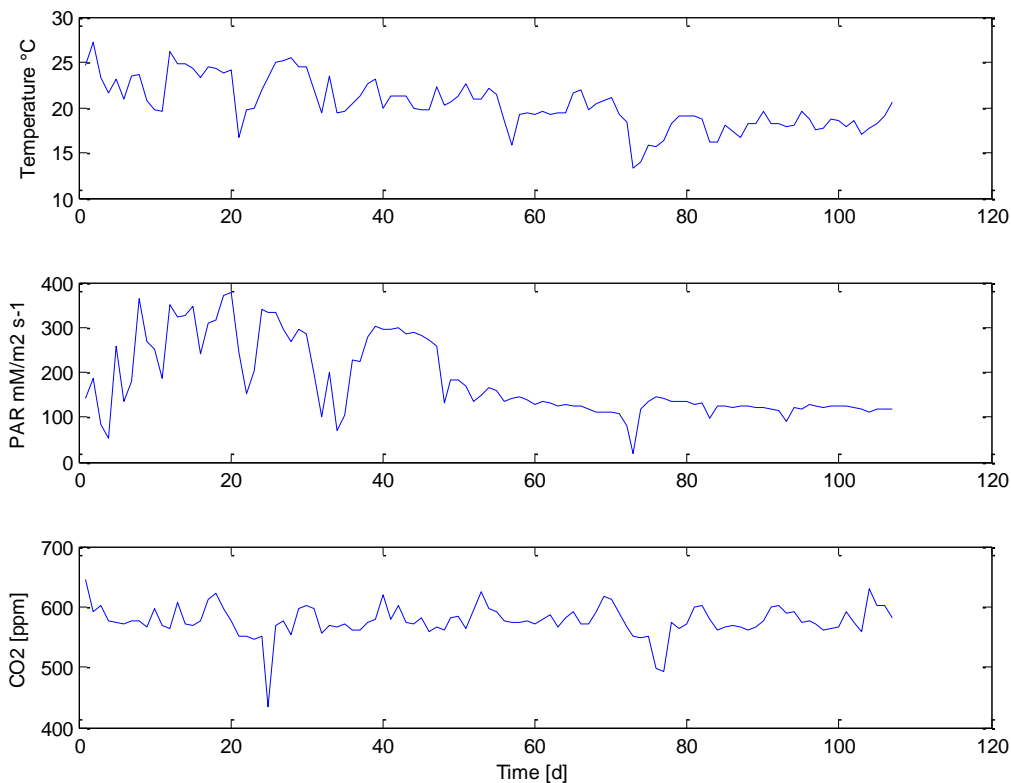
$$\Delta E = \sqrt{(L_t - L_0)^2 + (a_t - a_0)^2 + (b_t - b_0)^2} \quad (1)$$

El contenido de sólidos solubles y la acidez titulable fueron determinados preparando un jugo de jitomate. Se pesaron 20 g de jitomate y se molieron con 20 mL de agua destilada; la acidez titulable se midió titulando este jugo con una solución de NaOH 0.1N hasta alcanzar un pH de 8.2 y los resultados se expresaron como porcentaje de ácido cítrico (gramos de ácido cítrico por 100 g de peso fresco). El pH se determinó con un potenciómetro UltraBasic UB-10 (Denver Instruments). Una parte de la mezcla fue usada para medir inmediatamente los grados Brix con un refractómetro Master-500H (ATAGO) a 20°C. El contenido de clorofila fue determinado usando 2g de jitomate molido con 10 mL de acetona y aforado hasta un volumen final de 25 mL. La absorbancia fue determinada a 642 y 660 nm con un espectrofotómetro Genesys 20 (Thermo Fisher Scientific), los resultados se reportaron como nanomoles por mililitro de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Chl\ total = (8.29 * A_{660}) + (19.54 * A_{642}) \quad (2)$$

donde  $A_{642}$  y  $A_{660}$  son las absorbancias a 642 y 660 nm, respectivamente.

La materia seca fue evaluada cada 7 días en tres plantas diferentes por cada tratamiento, las plantas se secaron durante 72 h a 90 °C. Los valores de materia seca total, materia seca de frutos totales y materia seca de frutos maduros fueron obtenidos y el promedio de tres repeticiones fue utilizado como valor de entrada para el TOMGRO. El número de nodos y el índice de área foliar (LAI) también se midieron cada 7 días. El área foliar fue estimada mediante procesamiento de imágenes usando una cámara equipada con un sensor CCD MT9M011 (Micron Technology, Boise, ID, USA) para capturar la imagen, el LAI fue calculado como la relación area foliar/area ( $m^2/m^2$ ). Las variables climáticas evaluadas fueron radiación fotosintéticamente activa (PAR), concentración de CO<sub>2</sub> (CO) y temperatura (T). Estas variables fueron medidas diariamente durante todo el ciclo de cultivo del tomate (desde plántula hasta etapa de fructificación) con un data logger WatchDog® (Spectrum Technologies, IL, USA) (Fig. II.2) el intervalo de muestreo fue de 30 min. La mitad de los datos se utilizó para la calibración y el resto para validar el modelo.



**Figura III.1** Variables de entrada del modelo TOMGRO medidas durante todo el ciclo de cultivo



### III.2.3 Análisis de color

Las mediciones de color se llevaron a cabo usando un espectrofotómetro Minolta CM-2002 (Konica Minolta, Tokio, Japón), y se expresaron como  $L^*$  (luminosidad),  $a^*$  (verde a rojo) y  $b^*$  (azul a amarillo), estos parámetros se basan en la escala CIELab (International Commission on Illumination Laboratory) a una intensidad de iluminación D65 (Luz de día neutral). El instrumento fue calibrado entre cada medición con una placa de cerámica blanca. EL color de los frutos fue medido en dos puntos diferentes a lo largo de la región ecuatorial de cada fruto, y el promedio de estas dos mediciones fue usado para el análisis estadístico. En esta investigación los valores de coloración rojiza fueron representados como el cociente Minolta  $a^*/b^*$  debido al convencionalismo utilizado en el sistema Hunter durante muchos años (Batu, 2004; Yang y Chinnan, 1988). También el valor  $(a^*/b^*)^2$  fue calculado junto con el ángulo Hue ( $h^\circ = \arctang(b^*/a^*)$ ).

### III.2.4 Estimación de área foliar

En cada tratamiento se seleccionaron al azar tres plantas de las cuales se obtuvo una sola hoja de cada una, esto se repitió cada 7 días. Un total de 1914 hojas fueron analizadas durante todo el experimento. De cada hoja se obtuvo el largo (L) desde el peciolo hasta el foliolo central y el ancho máximo de cada hoja (W) medido en la parte más ancha de cada hoja, desde la punta de cada foliolo (Fig. III.2).

EL área foliar real (RLA) de cada hoja, tomada como referencia, fue estimada usando una cámara equipada con un sensor CCD MT9M011 (Micron Technology, Boise, ID, USA) para capturar la imagen. Estos valores fueron utilizados después como entradas para un algoritmo de procesamiento de imágenes que permitiría estimar el área foliar.

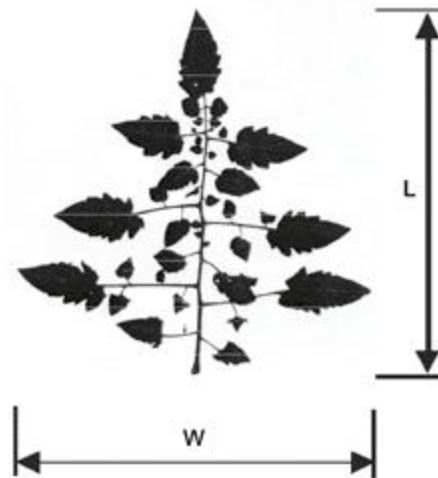


Figura III.2 Dimensiones características de las hojas para la estimación del área foliar

### III.2.5 Cuantificación de licopeno y $\beta$ -caroteno

Se obtuvieron muestras de 10 g de tomate fresco en cada estado de maduración a partir de cada uno de los tratamientos. Cada muestra fue cortada en pequeños trozos y homogenizada en una licuadora durante 1 min con agua desionizada. Alicuotas de esta suspensión fueron empleadas para ser liofilizadas. Se realizaron tres repeticiones por cada muestra.

Para la liofilización primero se centrifugaron las alícuotas a 25,000 g durante 10 min usando una centrifuga PRISM R (Labnet International, Inc.) para remover sustancias solubles. Los pellets, esencialmente formados de células, fueron liofilizados con nitrógeno líquido. La materia congelada fue molida en un mortero para obtener 5 g de polvo homogéneo.

Los carotenoides se extrajeron con una solución al 0.1% (p/v) de hidroxitolueno butilado (BHT) en etanol (1:1 v/v). El licopeno y el  $\beta$ -caroteno fueron separados mediante hexano. El hexano se evaporó por inyección directa de nitrógeno hasta secar la muestra. El sobrenadante fue resuspendido en etanol grado HPLC e inyectado directamente. Se utilizó un equipo Agilent HPLC 1200 Series (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) equipado con un detector de longitud de onda variable G1314B, la separación se realizó a 40°C en una columna Waters

Symmetry HPLC C<sub>18</sub> (3.5 µm × 75 mm) usando un gradiente lineal de metanol (A), acetonitrilo (B) y diclorometano (C) en relación A:B:C 55:40:5 v/v/v, a un tasa de flujo de 1.5 mL/min. Se emplearon estándares de licopeno y β-caroteno disolviendo 1 mg del estándar en 100 µL de metanol:acetonitrilo:diclorometano 55:40:5. La concentración de las soluciones estándar fue de  $2.22 \times 10^{-4}$  mg/µL de licopeno y  $6 \times 10^{-5}$  mg/µL para el β-caroteno. Los picos se detectaron a 450 nm.

### III.2.6 Perfil sensorial descriptivo

Para cada tratamiento se emplearon lotes de 24 jitomates para el análisis sensorial. El análisis descriptivo se realizó en un laboratorio de análisis sensorial. Quince panelistas entrenados de acuerdo al método Spectrum® (Mailgaard *et al.*, 1991) tomaron parte en las evaluaciones. Tres meses antes de los análisis, los panelistas fueron sujetos a sesiones de entrenamiento para familiarizarse con los términos descriptivos (4 sesiones por semana de 60 min cada una). Durante las sesiones de entrenamiento, los panelistas alcanzaron una desviación estándar en sus resultados menor a 1.0. Los panelistas evaluaron las muestras de tomate de acuerdo a los descriptores contenidos en un formulario (Tabla III.3).

Durante las sesiones, los panelistas evaluaron 5 muestras de jitomate derivadas de 5 tratamientos, las muestras se presentaron por duplicado. Cada miembro del panel acudió a dos sesiones para evaluar 5 muestras en cada una. Las muestras se presentaron en cada sesión totalmente al azar. Para todas las sesiones se utilizó una escala de intensidades. La intensidad o fuerza para cada término descriptivo se describió como apenas detectable (1) e intensidad extrema (15).

Tabla III.3 Descriptores sensoriales utilizados en las sesiones por el panel de evaluadores

Descriptor	Definición	Referencia* e intensidad†
<b>Aroma</b>		
Aroma global	Intensidad de la impresión global originada por los compuestos volátiles liberados durante la percepción nasal	Leche en polvo Nestle = 4.0 Goma de mascar Wrigley Spearmint = 11
Cítrico	Aroma asociado con compuestos característicos del limón, naranja y uva	1 g de limón molido colocado en una copa = 9.0
Fresco	Aroma asociado con compuestos característicos de pasto, eucalipto y menta	Cubos de tomate fresco de 1 cm = 6.0
Herbáceo	Aroma asociado con compuestos característicos de hojas verdes	Hojas de tomate molidas colocadas en una copa = 10.0
Floral	Sensación aromática asociada con compuestos aromáticos característicos de geranio, violeta y rosas	Flores de tomate molidas colocadas en una copa = 8.0
<b>Sabor</b>		
Dulce	Sensación asociada con soluciones de azúcar en diferente concentración	Solución de sacarosa al 1% = 1.0 Solución de sacarosa al 6% = 6.0
Salado	Sensación asociada con soluciones de sal en diferentes concentraciones	Solución de NaCl al 0.20 % = 2.5 Solución de NaCl al 0.60% = 8.5
Ácido	Sensación asociada con soluciones de ácido cítrico en diferentes concentraciones	Solución de AC al 0.05% = 3.5 Solución de AC al 0.10% = 10
Amargo	Sensación asociada con soluciones de cafeína en diferentes concentraciones	Solución de cafeína 0.01% = 2.0 Solución de cafeína 0.035% = 5.0
Vegetativo	Sensación asociada con el sabor generado por los compuestos característicos de vegetales procesados y frescos	Chícharos enlatados Del Monte = 8.0
<b>Textura</b>		
Dureza externa	Describe la resistencia del producto cuando se comprime con una cuchara	Puré de tomate Campbell's = 4.0 Tomate fresco = 7.0
Jugosidad	Describe la cantidad de agua liberada por el producto en la boca durante el masticado	Rebanadas de aguacate = 5.0 Rebanadas de naranja = 15.0
Grumosidad	Describe la sensación de formación de grumos durante el masticado	Cubo de pera de 1 cm = 8.0
Dureza a la primer mordida	Describe la dureza del producto cuando se muerde con los dientes incisivos por primera vez	Queso Kraft Philadelphia = 1.0 Rodajas de zanahoria = 11.0
<b>Resabio</b>		
Vegetativo	Sabor básico asociado con vegetales frescos o procesados después de la masticación	Chícharos enlatados Del Monte = 8.0

\* Las referencias fueron preparadas aproximadamente 24 h antes de cada sesión, refrigeradas durante la noche y retiradas del refrigerador 30 min antes de cada sesión de entrenamiento.

† Intensidad La intensidad se basa en una escala de 15 puntos con incrementos de 1.0, donde 1 representa apenas detectable y 15 representa intensidad extrema.

Las muestras de jitomate fueron lavadas con agua corriente fría, se secaron con una toalla limpia y se colocaron en porciones cúbicas de un centímetro, se sirvieron cinco porciones de cada muestra a cada panelista. Los panelistas recibieron dos porciones de cada muestra en un plato de plástico desechable etiquetado con un código de tres dígitos. A cada panelista se le pidió:

1. Evaluar el aroma y características visuales (color y apariencia);
2. Usar una porción de jitomate para evaluar sabor y textura.
3. Usar el resto de las porciones para primera mordida, primer masticada y evaluación de resabio. A los panelistas se les permitió comerse el segmento completo de jitomate.

Los panelistas enjuagaron su boca con agua mineral para neutralizar los sabores residuales en el paladar entre cada muestra, y también se les proporcionó una galleta integral después de enjuagar su boca. Ninguna información les fue proporcionada a los panelistas acerca de las muestras de jitomate ni de los tratamientos a los que fueron sometidas.

### **III.2.7 Análisis de sensibilidad del modelo TOMGRO reducido**

El modelo reducido para crecimiento de tomate (TOMGRO), descrito a detalle por Jones et al. (1991), forma parte de esta investigación. La versión reducida del modelo TOMGRO presenta ecuaciones para procesos básicos como fotosíntesis, respiración, desarrollo de nodos y desarrollo de área foliar. El modelo TOMGRO estima la producción y desarrollo en respuesta a las variables climáticas temperatura, radiación, y concentración de CO<sub>2</sub> dentro de un invernadero. Los parámetros del modelo se muestran en la Tabla III.4 donde se indican los correspondientes intervalos para evaluar la incertidumbre en esta investigación.

Tabla III.4 Definición e intervalos de los parámetros del modelo TOMGRO para el análisis de sensibilidad

Parameter	Symbol	Units	Nominal value	Upper limit	Lower limit
Maximum rate of node appearance	Nm	node d <sup>-1</sup>	0.495	0.5445	0.4455
Maximum leaf area expansion per node	δ	m <sup>2</sup> node <sup>-1</sup>	0.041	0.0451	0.0369
Coefficient in expolinear equation	β	node <sup>-1</sup>	0.22	0.242	0.198
Projection of linear segment of LAI vs N to horizontal axis	Nb	node	18.5	20.35	16.65
Growth efficiency, ratio of biomass to photosynthate available for growth	E	d <sup>-1</sup>	0.7	0.77	0.63
Conversion coefficient of CO <sub>2</sub> to CH <sub>2</sub> O	D	g m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>	0.108	0.1188	0.0972
CO <sub>2</sub> conductance	τ	μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	0.0664	0.07304	0.05976
Development time from first fruit to first ripe fruit	K <sub>F</sub>	node	0.58	0.638	0.522
Light transmission coefficient	m	dimensionless	0.1	0.11	0.09
Maintenance respiration coefficient	K <sub>m</sub>	g g <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	0.006	0.0066	0.0054
Coefficient of biomass partitioning depending on plant development stage	fcN	unitless (0 to 1 function)	0.85	0.935	0.765
Parameter involved in photosynthesis reduction factor	φh	μmolCO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	30	33	27
Parameter involved in photosynthesis reduction factor	φl	μmolCO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	5	5.5	4.5
Maximum partitioning of new growth to fruit	α <sub>F</sub>	d <sup>-1</sup>	0.95	1.045	0.855
Transition from vegetative development to fruit development	v	node <sup>-1</sup>	0.24	0.264	0.216
Nodes per plant when first fruit appears	N <sub>FF</sub>	node	14.88	16.368	13.392
Radiation utilization efficiency	α	μmol μmol <sup>-1</sup>	0.09	0.099	0.081

Los valores altos y bajos corresponden a variaciones del 10% respecto al valor nominal del parámetro

### III.2.8 Metodología de análisis de sensibilidad global

Con la finalidad de estimar los índices de sensibilidad global se aplicó el siguiente procedimiento (Saltelli et al., 2008):

**Paso 1. Especificación del objetivo:** Para determinar cuáles parámetros del modelo tienen mucha o poca influencia sobre las variables de estado del modelo. Ni las variables de entrada ni las condiciones iniciales del modelo toman parte en el análisis de sensibilidad.

**Paso 2. Selección de parámetros:** Sólo 17 parámetros del modelo TOMGRO reducido fueron incluidos en el análisis de sensibilidad.

**Paso 3. Elegir las funciones de densidad de probabilidad (PDFs) para cada parámetro:** Se seleccionaron funciones de densidad de probabilidad uniforme para todos los parámetros. El intervalo de variación respecto al valor nominal fue definido a partir de la información disponible en la literatura y se fijó en 10% alrededor del valor nominal de cada parámetro.

**Paso 4. Selección del método de análisis de sensibilidad:** Se aplicaron dos métodos basados en la varianza de los datos (Saltelli et al., 2008). La prueba de amplitud de sensibilidad de Fourier (FAST) y el método de Sobol' (Monod et al., 2006) fueron aplicados, lo cual permitió la estimación de los índices de sensibilidad de primer orden ( $S_i$ ) y los de orden total ( $S_{Ti}$ ). El índice de sensibilidad de primer orden representa la contribución principal de cada parámetro a la varianza de la salida del modelo. El índice de efectos totales involucra la contribución total a la varianza de la salida debida al factor  $X_i$ , en otras palabras, representa el índice de primer orden más los efectos de orden superior debido a las interacciones entre todos los parámetros (López-Cruz et al., 2004).

**Paso 5. Generación de valores de entrada a partir de las PDFs:** El software SimLab (ver. 3.2) para el análisis de sensibilidad (SimLab, 20011) fue utilizado para generar una muestra de tamaño  $N=3000$  mediante el método FAST y una muestra con  $N=2000$  para el método de Sobol' a fin de alcanzar una adecuada de los índices de sensibilidad (Saltelli et al., 2004; Saltelli et al., 2008). Para ambos métodos los valores de los índices de sensibilidad convergieron en un intervalo de 7000 muestras. Para la mayoría de los parámetros menos de 5000 muestras fueron suficientes para alcanzar valores estables (datos no mostrados).

**Paso 6. Evaluación del modelo:** El modelo evaluado fue el TOMGRO reducido. Un total de 5000 simulaciones fueron llevadas a cabo mediante los dos métodos para estimar las cinco variables de estado: peso seco total,  $W$ , peso seco de frutos totales,  $W_F$ , peso seco de frutos maduros,  $W_M$ , número de nodos,  $N$ , y el índice de área foliar, LAI. El método de Runge-Kutta

con paso de integración variable fue utilizado con una tolerancia relativa de  $10^{-8}$  y una tolerancia absoluta de  $10^{-12}$  para llevar a cabo la integración numérica. El modelo fue implementado en un ambiente MATLAB-Simulink. Para fines prácticos sólo se calcularon los índices de sensibilidad al final del ciclo de cultivo. Sin embargo, los índices de sensibilidad pueden ser calculados en cualquier tiempo.

**Paso 7. Análisis de las salidas del modelo:** Ambos índices de sensibilidad fueron estimados. Además se generaron las gráficas correspondientes para cada variable de estado de los valores medidos y los estimados por el modelo para verificar la importancia de cada parámetro sobre las respuestas del modelo TOMGRO reducido.

### III.2.9 Calibración del modelo TOMGRO reducido

El proceso utilizado para calibrar el modelo se muestra en la Fig. III.3. Debido a la importancia de cada elemento, esta tesis también se enfoca en el estudio de la calibración. Antes de entrar propiamente en la parte de la calibración del modelo, es importante realizar un análisis de sensibilidad (van Henten, 2003), el cual evalúa la importancia relativa de cada uno de los parámetros en las salidas del modelo (Saltelli et al., 2000). Para lograr un ajuste adecuado del modelo, es necesario encontrar valores para los parámetros del modelo. Un método apropiado para realizar la calibración es mediante el uso de una función de optimización no lineal multivariable para minimizar la suma de los errores ( $J$ ):

$$J(p) = \sum_{h=1}^L \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W_h \left( \bar{y}_h(t_i, p) - y_{hj}(t_i) \right)^2 \quad (1)$$

$$p^* = \operatorname{argmin} J(p)$$

Donde  $W_h$  es el peso relativo de cada salida,  $\bar{y}_h(t_i, p)$  es la salida de la simulación,  $y_h$  al tiempo  $t_i$ ,  $y_{hj}(t_i)$  es la  $j$ th repetición de la medición  $y_h$ , en el tiempo  $t_i$ ,  $L$  es el número de salidas,  $M$  es el número de datos reales,  $N$  es el número de repeticiones de cada dato real,  $p$  es el set de parámetros a calibrar y  $p^*$  son los parámetros que reducen  $J(p)$  al mínimo. Los pesos  $W_h$  determinan la importancia relativa de las diferentes salidas en la ecuación (1). Estos se calculan



mediante normalización del vector de salidas para evitar problemas con las unidades de cada variable de estado. En este trabajo, la minimización de la ecuación (1) se realiza utilizando algoritmos evolutivos (EAs) como los algoritmos genéticos (GAs).

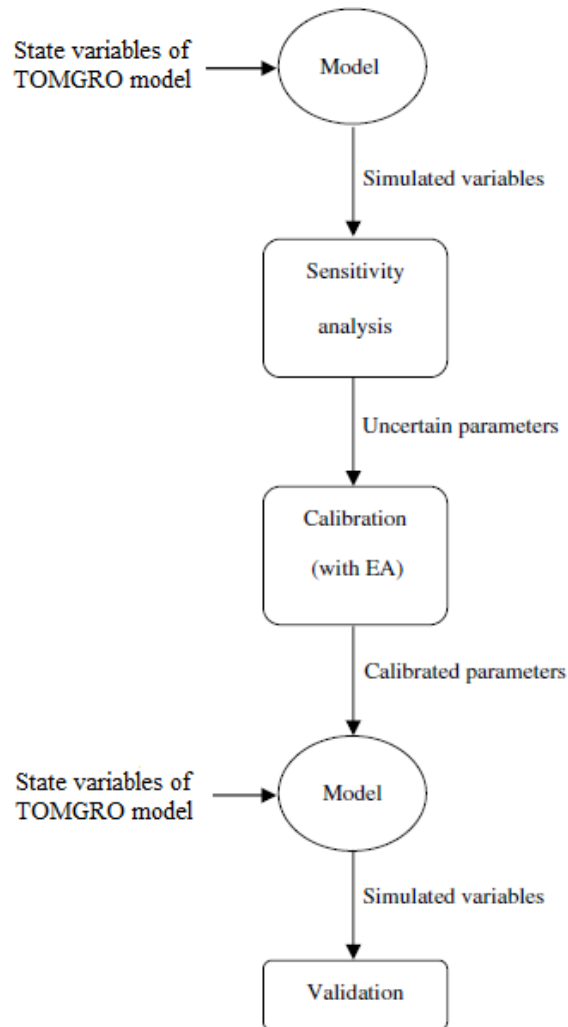


Figura III.3 Diagrama del proceso de calibración del modelo TOMGRO (adaptado de Guzmán-Cruz et al., 2009)

La estructura de cualquier EA es la misma, las diferencias entre las técnicas evolucionarias recaen en el tipo de selección, mutación, y operadores de cruas aplicados para encontrar el valor óptimo de los parámetros a calibrar. En el caso de los Gas, es necesario un conjunto de valores reales para elegir un candidato para la solución del problema (Eiben y Smith, 2003) que es un vector  $(p_1, \dots, p_s)$  donde  $p_i \in \mathbb{R}$  y  $s$  es el número de parámetros que necesitan ser calibrados.

La selección de los padres es determinística y se realiza por medio de torneo (Coello, 2007) el cual está descrito a detalle por Guzman-Cruz et al. (2009).

### III.3 Análisis estadístico

Para cada variable en este estudio los datos fueron sujetos a un análisis de varianza y la diferencia entre las medias fue determinada por la prueba LSD a un nivel de significancia de  $p < 0.05$ . Los datos fueron analizados utilizando el software JMP 5.0.1 (SAS Institute Inc.)

Los datos del análisis sensorial fueron analizados con STATGRAPHICS Centurion XVI versión 16.0.03 (StatPoint Technologies, Inc.). La comparación de medias y la interacción entre los tratamientos y los panelistas fue evaluada mediante análisis ANOVA de una y dos vías a un nivel de significancia de  $p < 0.05$ . El análisis de componentes principales (ACP) (por el método de covarianza) fue aplicado a la matriz de medias de los datos sensoriales en cada tratamiento. La matriz de datos sensoriales fue analizada posteriormente sólo para aquellos atributos que mostraron diferencias significativas entre los tratamientos. Estos datos fueron analizados mediante análisis jerárquico (HCA) para agrupar aquellos tratamientos con perfiles sensoriales similares.

#### III.3.1 Indicadores de ajuste del modelo

El coeficiente de determinación  $R^2$  es la medida de la correlación entre los datos observados y los estimados (Neter et al., 1996). Algunos otros indicadores importantes son el error porcentual estándar de la predicción ( $\%SEP$ ), el coeficiente de eficiencia ( $E$ ) y la varianza relativa promedio ( $ARV$ ) (Ventura et al., 1995; Kitanidis et al., 1980; Griño, 1992). Estos estimadores no son influenciados por el rango de variación de sus elementos. Son empleados para determinar la capacidad de un modelo matemático para explicar la varianza total de los datos. El error porcentual estándar de la predicción se define de la siguiente manera:

$$\%SEP = \frac{100}{\bar{y}_k} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2}{N}} \quad (2)$$

Donde  $y_k$  son los datos medidos para cada variable;  $\hat{y}_k$  son los datos estimados por el modelo;  $N$  representa el número total de observaciones y  $\bar{y}_k$  es el promedio de los valores estimados mediante el modelo.

El coeficiente de eficiencia ( $E$ ) y la varianza promedio relativa ( $ARV$ ) se expresan mediante:

$$E = \frac{S_{obs} - S}{S_{obs}}; \quad ARV = \frac{S}{S_{obs}} \quad (3)$$

$$S_{obs} = \sum_{k=1}^N (y_k - \bar{y}_k)^2; \quad S = \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (4)$$

Donde  $S_{obs}$  es la magnitud de la varianza observada en los valores medidos y  $S$  es la magnitud de la asociación entre los valores estimados y medidos. Para un ajuste adecuado,  $R^2$  y  $E$  deben ser cercanos a 1.0 y los valores de %SEP y  $ARV$  deben ser cercanos a 0 (Rios-Moreno et al., 2006). También el parámetro RMSE fue calculado para estimar los errores en las estimaciones:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (5)$$

$P_i$  es el valor simulado y  $O_i$  es el valor observado. Los estadísticos anteriores han sido ampliamente utilizados para la evaluación de modelos matemáticos (Kobayashi & Salam, 2000).

### III.3.2 Modelo de estimación de variables de calidad acoplado al modelo Tomgro reducido.

El principal objetivo de esta investigación fue desarrollar un modelo matemático que pudiera acoplarse a las salidas del modelo Tomgro reducido con la finalidad de estimar variables de calidad fisicoquímica, sensorial y funcional importantes durante el desarrollo del fruto de Tomate. El modelo Tomgro reducido estima crecimiento y producción de plantas de tomate en función de variables de entrada como radiación, temperatura y concentración de  $CO_2$ . Dicho modelo estima cinco variables de estado: número de nodos ( $N$ ), índice de área foliar ( $LAI$ ), materia seca total de la planta ( $W$ ), materia seca de frutos totales ( $W_F$ ) y materia seca de frutos maduros ( $W_M$ ). Las variables de calidad que fueron consideradas para esta investigación fueron: cantidad de licopeno ( $Ly$ ) y  $\beta$ -caroteno ( $\beta_{CAR}$ ), sólidos solubles totales ( $SST$ ), y las variables sensoriales intensidad de sabor dulce ( $S_W$ ) y ácido ( $A_C$ ). Las variables anteriores se estimaron en 6 diferentes etapas de maduración del tomate. De las variables de estado del modelo Tomgro la que más se correlacionó con las variables de calidad fue la materia seca de frutos maduros ( $W_M$ ).

Dicha variable se tomó como base para generar un modelo complementario al Tomgro para estimar la calidad de los frutos.

Matemáticamente el modelo de calidad que aquí se propone para un cultivo en invernadero se definió de la siguiente manera:

$$y = f(x, p, t) \quad y(x_0) = y_0$$

Donde  $y$  es el vector de variables de calidad:

$$y = (Ly, \beta_{CAR}, SST, S_W, A_C)$$

$$x = W_M$$

$$p = \text{vector de parámetros}$$

$$t = \text{tiempo}$$

Con el vector de condiciones iniciales:

$$X_0 = (CO_0, AS_0, T_0, PAR_0)$$

$$y_0 = (Ly_0, \beta_{CAR0}, SST_0, S_{W0}, A_{C0})$$

Donde CO es la concentración de dióxido de carbono, AS es la concentración de ácido salicílico, T es la temperatura, y PAR es la radiación fotosintéticamente activa. De manera similar Ly es el contenido de licopeno en cada etapa de maduración,  $\beta_{CAR}$  es el contenido de  $\beta$ -caroteno, SST es el contenido de sólidos solubles totales ( $^{\circ}$ Brix), acidez total ( $A_T$ )  $S_W$  y  $A_C$  son la intensidad de sabor dulce y ácido, respectivamente.

La mejor manera de correlacionar los datos de materia seca de frutos maduros con los datos de calidad como un solo sistema se logró mediante un modelo polinomial de segundo orden cuya forma general es la siguiente:

$$y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_0$$

En la expresión anterior  $\alpha$  representa los coeficientes resultantes del ajuste del polinomio y  $x$  representa a  $W_M$  resultante de las simulaciones del modelo Tomgro reducido después de la calibración. El modelo resultante se muestra a continuación en un set de cinco ecuaciones que representan a cada una de las variables de calidad:

$$Ly = a_{11}W_M^2 + a_{12}W_M + a_{13}$$

Donde los coeficientes  $a$  se estimaron de la siguiente manera:

$$a_{1j} = \alpha_{1j} + \alpha_{2j}CO + \alpha_{3j}CO^2 + \alpha_{4j}AS + \alpha_{5j}AS^2 + \alpha_{6j}AS^3 + \alpha_{7j}T + \alpha_{8j}T^2 + \alpha_{9j}PAR + \alpha_{10j}PAR^2$$

$$j = 1,2,3 \text{ para todas las ecuaciones}$$

Se procedió del mismo modo para las variables restantes con sus respectivos coeficientes:

$$\beta_{CAR} = b_{21}W_M^2 + b_{22}W_M + b_{23}$$

$$b_{2j} = \beta_{1j} + \beta_{2j}CO + \beta_{3j}CO^2 + \beta_{4j}AS + \beta_{5j}AS^2 + \beta_{6j}AS^3 + \beta_{7j}T + \beta_{8j}T^2 + \beta_{9j}PAR + \beta_{10j}PAR^2$$

$$SST = c_{31}W_M^2 + c_{32}W_M + c_{33}$$

$$c_{3j} = \gamma_{1j} + \gamma_{2j}CO + \gamma_{3j}CO^2 + \gamma_{4j}AS + \gamma_{5j}AS^2 + \gamma_{6j}AS^3 + \gamma_{7j}T + \gamma_{8j}T^2 + \gamma_{9j}PAR + \gamma_{10j}PAR^2$$

$$S_W = d_{41}W_M^2 + d_{42}W_M + d_{43}$$

$$d_{4j} = \delta_{1j} + \delta_{2j}CO + \delta_{3j}CO^2 + \delta_{4j}AS + \delta_{5j}AS^2 + \delta_{6j}AS^3 + \delta_{7j}T + \delta_{8j}T^2 + \delta_{9j}PAR + \delta_{10j}PAR^2$$

$$A_C = e_{51}W_M^2 + e_{52}W_M + e_{53}$$

$$e_{5j} = \varepsilon_{1j} + \varepsilon_{2j}CO + \varepsilon_{3j}CO^2 + \varepsilon_{4j}AS + \varepsilon_{5j}AS^2 + \varepsilon_{6j}AS^3 + \varepsilon_{7j}T + \varepsilon_{8j}T^2 + \varepsilon_{9j}PAR + \varepsilon_{10j}PAR^2$$

$$A_T = f_{51}W_M^2 + f_{52}W_M + f_{53}$$

$$f_{5j} = \omega_{1j} + \omega_{2j}CO + \omega_{3j}CO^2 + \omega_{4j}AS + \omega_{5j}AS^2 + \omega_{6j}AS^3 + \omega_{7j}T + \omega_{8j}T^2 + \omega_{9j}PAR + \omega_{10j}PAR^2$$

En este modelo los coeficientes se estimaron para correlacionar los diferentes niveles de los factores evaluados en cada uno de los tratamientos. De esta manera, se pudo generalizar la respuesta de las variables de calidad a las diferentes condiciones climáticas existentes.

En el apéndice B se muestran los valores de los respectivos coeficientes para cada tratamiento, en cada caso se estimaron tres coeficientes por variable. Estos coeficientes se estimaron para

cada uno de los 10 tratamientos, es decir 30 coeficientes por tratamiento por 5 variables de calidad, en total 150 parámetros para generalizar dependiendo de las condiciones climáticas existentes.

# CAPÍTULO 4:

## IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### IV.1 Análisis fisicoquímicos

El pH, sólidos solubles totales y acidez total fueron evaluados en los frutos obtenidos de cada tratamiento. Los frutos obtenidos en condiciones de PARH mostraron los valores más bajos de pH, siendo 6.6% más bajos que los tratamientos T4 y TH, siendo los tratamientos con los valores más altos de pH (4.69) (Tabla IV.1). No hubo diferencias significativas para el contenido de sólidos solubles en los diferentes tratamientos. La acidez total varió entre 0.326 y 0.521 g ácido cítrico/100 g en los tratamientos T4 y TL, respectivamente.

**Tabla IV.1 Medias y desviaciones estándar para pH, sólidos solubles y acidez total medidos en los 10 tratamientos para jitomates en estado maduro (medias de tres repeticiones)**

pH				Sólidos solubles (°Brix)				Acidez total (g ácido cítrico/100 g FW)			
Tratamiento	Media	SD		Tratamiento	Media	SD		Tratamiento	Media	SD	
T4	4.69	0.05	a	T1	2.65	0.28	a	TL	0.52	0.002	a
TH	4.69	0.05	a	PARL	2.43	0.18	a	PARL	0.52	0.002	a
T3	4.62	0.04	ab	T4	2.35	0.35	a	PARH	0.48	0.007	ab
COL	4.61	0.02	ab	COL	2.31	0.14	a	T1	0.40	0.006	ab
COH	4.55	0.007	bc	TH	2.34	0.14	a	COL	0.39	0.0009	ab
PARL	4.54	0.01	bc	PARH	2.22	0.28	a	T3	0.39	0.0004	ab
TL	4.51	0.04	bc	TL	2.22	0.28	a	T2	0.38	0.002	ab
T2	4.48	0.02	cd	COH	2.10	0.14	a	COH	0.36	0.004	ab
T1	4.46	0.05	cd	T3	2.05	0.14	a	TH	0.35	0.007	ab
PARH	4.38	0.04	d	T2	1.95	0.21	a	T4	0.33	0.002	b

Medias en las columnas con letras diferentes son estadísticamente diferentes (P<0.05 Tukey HSD, H=alto, L=bajo)

## IV.2 Análisis colorimétricos y correlación con el estado de madurez

El color externo de los frutos se expresó de acuerdo a los parámetros Hunter ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) como se muestra en la tabla IV.2. El parámetro de color  $+a^*$ , el cual caracteriza la coloración roja de los frutos (Batu, 2004), presentó el valor más alto en el tratamiento T1 (28.20) y el más bajo en condiciones de PARL (20.19). El parámetro  $+b^*$  (intensidad del componente amarillo) fue más alto en el tratamiento T4 (31.20) y el más bajo en condiciones de COH (20.76). Para el componente  $L^*$ , el cual indica la luminosidad, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos. La relación  $a^*/b^*$ , índice de cambio en la coloración rojiza, presentó su valor más alto en condiciones de COH (1.15), y el valor más bajo se observó en condiciones de PARL (Tabla IV.2).

**Tabla IV.2 Medias y desviaciones estándar para los parámetros de color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  y  $a^*/b^*$ ) medidos en frutos obtenidos en cada uno de los 10 tratamientos (medias de dos repeticiones)**

$L^*$				$a^*$				$b^*$				$a^*/b^*$			
Tratamiento	Media	SD		Tratamiento	Media	SD		Tratamiento	Media	SD		Tratamiento	Media	SD	
COH	34.24	0.18	a	COH	23.86	0.40	ab	COH	20.76	0.72	d	COH	1.15	0.06	a
COL	35.41	0.43	a	COL	26.32	2.57	a	COL	29.47	1.33	ab	COL	0.89	0.05	bcd
PARH	36.10	0.98	a	PARH	23.26	0.39	ab	PARH	26.33	1.20	bc	PARH	0.88	0.06	bcd
PARL	36.73	1.04	a	PARL	20.19	0.63	b	PARL	24.67	1.10	cd	PARL	0.82	0.01	d
T1	34.07	0.89	a	T1	28.20	0.69	a	T1	26.83	0.68	abc	T1	1.05	0.01	ab
T2	35.30	0.58	a	T2	24.54	0.26	ab	T2	28.42	0.63	abc	T2	0.86	0.01	cd
T3	36.34	0.04	a	T3	25.29	0.75	ab	T3	27.43	1.08	abc	T3	0.92	0.01	bcd
T4	34.97	1.79	a	T4	27.62	2.09	a	T4	31.20	1.16	a	T4	0.89	0.10	bcd
TH	35.45	0.11	a	TH	26.77	1.96	a	TH	26.54	2.37	abc	TH	1.01	0.02	abc
TL	36.65	0.51	a	TL	24.82	0.61	ab	TL	26.59	0.04	abc	TL	0.93	0.02	bcd

Means in the column with different letters are statistically different ( $P < 0.05$  Tukey HSD), H=high; L=low.

## IV.2 Análisis descriptivo sensorial

Uno de los objetivos de este estudio fue establecer si existían diferencias en los datos del perfil sensorial de los tomates cultivados bajo los 10 tratamientos establecidos en el diseño experimental. También, se analizó el uso de la escala sensorial y de los descriptores por parte de

los panelistas con la finalidad de evaluar su capacidad de analizar los diferentes atributos. Los datos obtenidos del ANOVA para panelistas y tratamientos se muestran en la tabla IV.3. Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos para tres descriptores relacionados con textura a un valor  $P > 0.05$ , bajo estas mismas condiciones no se hallaron diferencias significativas entre los panelistas. La interacción entre panelistas y tratamientos ( $T \times P$ ) no produjeron diferencias significativas en los descriptores evaluados.

**Tabla IV.3 Resultados del análisis de varianza ANOVA de una y dos vías para tratamiento (T), panelista (P) y su interacción ( $T \times P$ ) a partir de los datos de análisis sensorial**

Descriptores	Tratamiento	Panelista	$T \times P$
<b>Aroma global</b>	ns	ns	ns
<b>Cítrico</b>	ns	ns	ns
<b>Fresco</b>	ns	ns	ns
<b>Herbaceo verde</b>	ns	ns	ns
<b>Floral</b>	ns	ns	ns
<b>Dulce</b>	ns	ns	ns
<b>Salado</b>	ns	ns	ns
<b>Acido</b>	ns	ns	ns
<b>Amargo</b>	ns	ns	ns
<b>Vegetativo</b>	ns	ns	ns
<b>Dureza externa</b>	"	ns	ns
<b>Dureza primera mordida</b>	"	ns	ns
<b>Jugosidad</b>	"	ns	ns
<b>Grumosidad</b>	ns	ns	ns
<b>Resabio vegetativo</b>	ns	ns	ns

ns: no significativo

" : significativo a una  $P < 0.05$

El efecto de los tratamientos en el perfil sensorial se muestra en la figura IV.1. Como lo demuestra el análisis ANOVA (tabla IV.3), hubo diferencias significativas entre las intensidades de los descriptores sensoriales relacionados con la textura de los frutos. El efecto de los tratamientos se observó en los descriptores dureza externa, dureza en la primer mordida y jugosidad (Tabla IV.4). La dureza externa mostró la intensidad más alta en el tratamiento T4 (6.37) y la intensidad más baja en condiciones de PARH (4.89). Un comportamiento similar fue observado para la dureza en la primera mordida que mostró el valor más alto también en el tratamiento T4 (5.71) y su intensidad más baja se observó en condiciones de PARL (4.61).



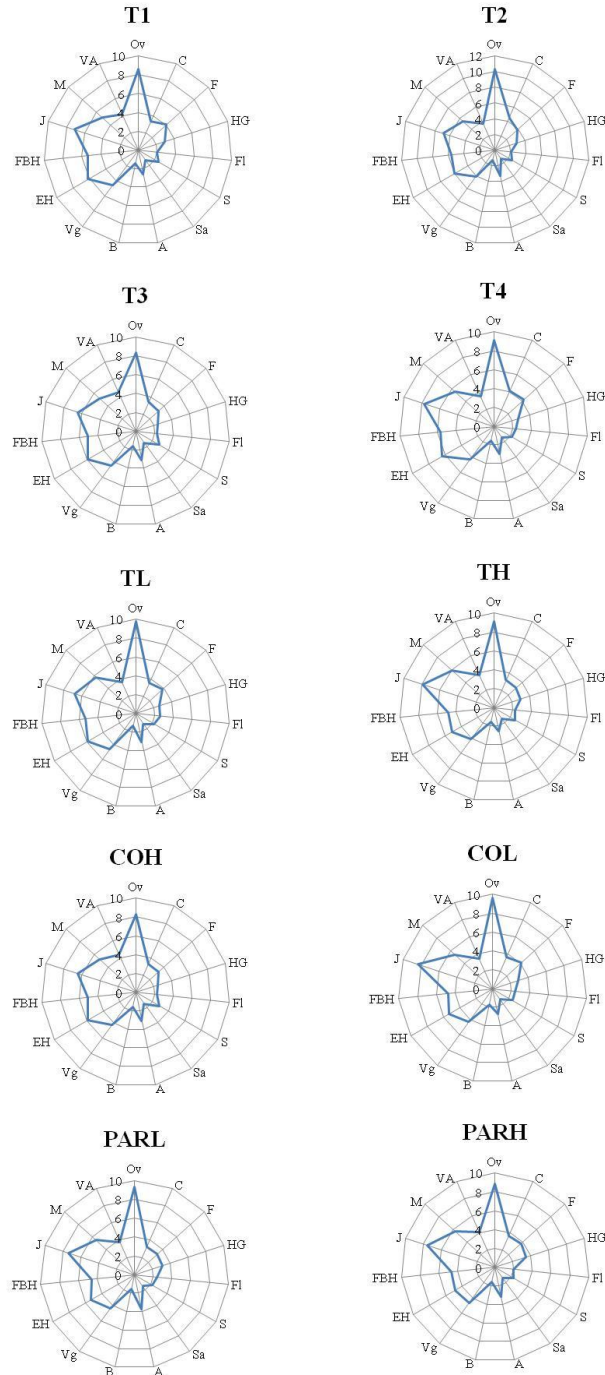


Figura IV.1 Efecto de las condiciones del clima y aplicaciones de AS en los atributos sensoriales de los frutos de tomate. Los valores representan el promedio de las intensidades de los descriptores (n=15). Las abreviaturas en la figura significan los siguiente: Ov, aroma general; C, cítrico; F, fresco; HG, herbáceo verde; FI, floral; S, dulce; Sa, salado; A, acido; B, amargo; Vg, vegetativo; EH, dureza externa; FBH, dureza en la primer mordida; J, jugosidad; M, mealiness; and VA, resabio vegetativo. Los valores de la figura representan el promedio de 30 mediciones por tratamiento

Para el descriptor jugosidad, las condiciones de COL indujeron la intensidad más alta (8.37), y el tratamiento T3 junto con las condiciones de COH mostraron la intensidad más baja de 6.46. Sólo los resultados de los descriptores de textura fueron utilizados para continuar con el análisis debido a que mostraron diferencias significativas entre los tratamientos.

**Tabla IV.4 Medias y desviaciones estándar de los descriptores de textura en los diferentes tratamientos (medias de 15 repeticiones)**

Dureza externa				Dureza primer mordida				Jugosidad			
Tratamiento	Media	SD		Tratamiento	Media	SD		Tratamiento	Media	SD	
PARH	4.89	1.55	b	PARH	4.68	1.48	ab	PARH	7.45	2.09	ab
T1	6.18	1.26	ab	T1	5.43	1.18	ab	T1	7.02	1.57	ab
T2	5.98	1.89	ab	T2	5.57	1.39	ab	T2	6.91	1.57	ab
T3	5.91	1.64	ab	T3	5.11	1.57	ab	T3	6.46	1.57	b
T4	6.37	1.17	a	T4	5.71	1.33	a	T4	7.73	1.99	ab
TH	5.14	1.68	ab	TH	4.93	1.53	ab	TH	7.95	2.11	ab
PARL	5.36	1.51	ab	PARL	4.61	1.54	b	PARL	7.43	1.68	ab
COH	5.91	1.64	ab	COH	5.11	1.57	ab	COH	6.46	1.57	b
TL	5.91	1.33	ab	TL	5.34	1.35	ab	TL	6.84	2.20	ab
COL	5.31	1.63	ab	COL	4.69	1.34	ab	COL	8.37	2.27	a

Las medias en las columnas con letras diferentes son estadísticamente diferentes (P<0.05 Tukey HSD), H=alto; L=bajo.

### IV.3 Análisis PCA y HCA de los descriptores sensoriales

En el análisis de componentes principales (PCA), figura IV.2, muestra las gráficas de los descriptores de textura con sus dos componentes principales. El PCA discriminó significativamente entre los tratamientos mediante los dos primeros componentes principales (PCs) los cuales explicaron el 73.78% y 23.03% de la varianza entre las muestras, respectivamente. Los descriptores que se correlacionaron positivamente con el componente principal 1 (PC1) fueron dureza a la primera mordida y dureza externa, y con el componente principal 2 (PC2) solo el descriptor jugosidad (Figura IV.2A). A partir del PCA, las varianzas de los atributos dentro de los dos primeros componentes fueron: dureza externa (64.2% de la varianza explicada), dureza en la primera mordida (61.4%) y jugosidad (87.9%). También se llevó a cabo el análisis jerárquico (HCA) en los datos sensoriales y se identificaron 3 clusters de tratamientos, los cuales presentaron diferentes posiciones en el espacio definido por los componentes PC1 y PC2.

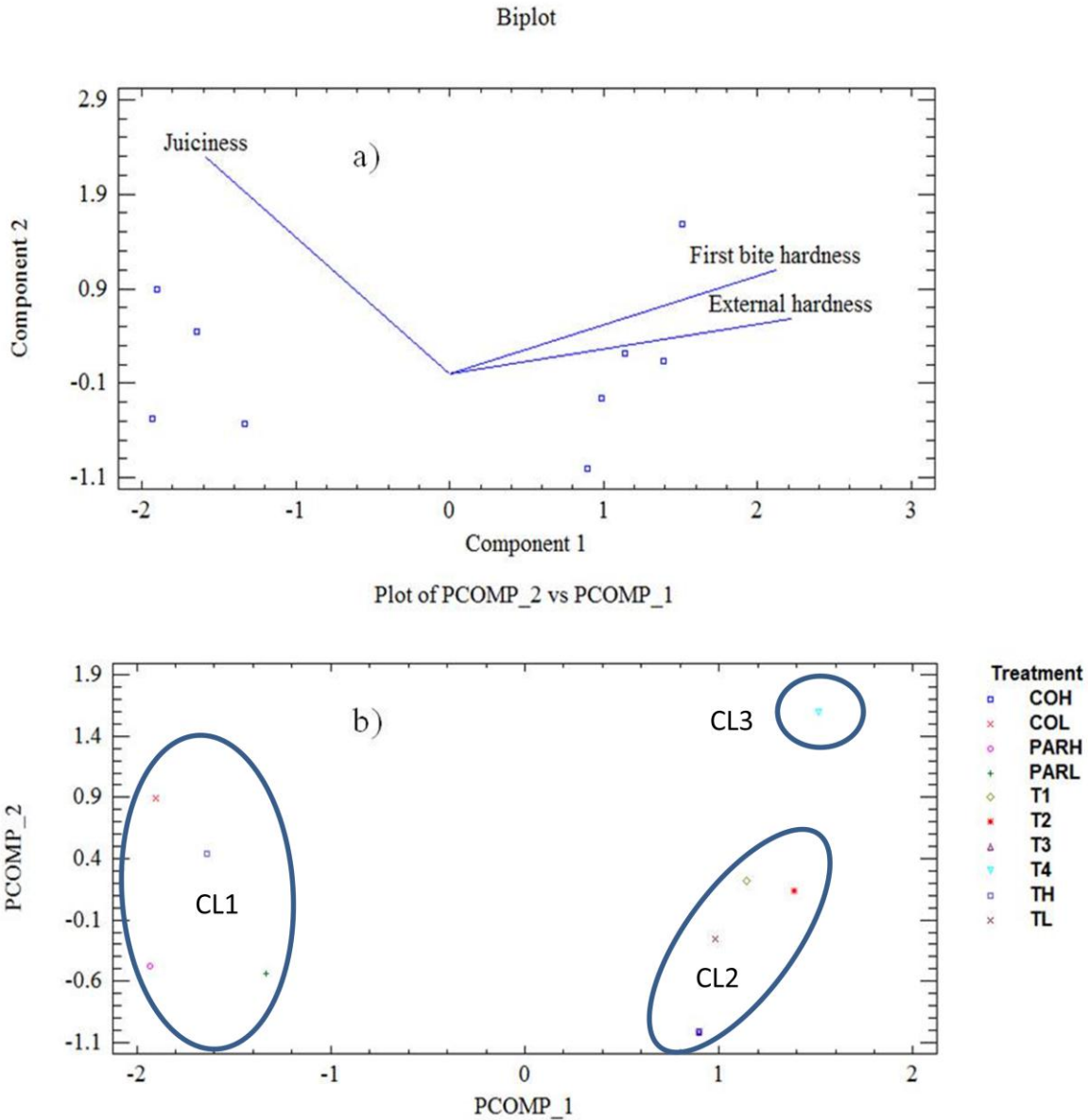


Figura IV.2 Análisis de componentes principales (PCA) de los resultados de la evaluación sensorial del tomate en los diferentes tratamientos para aquellos descriptores de textura que mostraron diferencias significativas. a) PCA biplot, b) Gráfica de puntajes PCA y análisis HCA.

Estos clusters se muestran en la figura IV.2B delimitados por líneas circulares y codificados como CL1, CL2 y CL3. Las muestras pertenecientes a un mismo cluster fueron consideradas como homogéneas en sus perfiles sensoriales. De los resultados del HCA, el PC1 distinguió el cluster CL2 (T1, T2, T3, COH y TL) del cluster CL3 (T4). Los tratamientos pertenecientes al cluster CL2 fueron caracterizados por el descriptor dureza externa (figura IV.2B). Para el

tratamiento perteneciente al CL3, la dureza en la primera mordida fue el descriptor más característico. El PC2 descrito por el atributo jugosidad (87.9% de la variación) separó CL1 (PARH, PARL, TH y COL). La variación más alta se observó entre los tratamientos correspondientes a la temperatura (T) y concentración de CO<sub>2</sub> (CO) los cuales están claramente separados en el plano, mientras que los tratamientos de radiación (PAR) pertenecientes a CL1 fueron poco discriminados. También los tratamientos de AS mostraron gran variación entre ellos, T1, T2 y T3 (0.01, 0.1 y 0 mM de AS, respectivamente) pertenecieron a CL2 mientras que T4 (la concentración más alta de AS, 1.0 mM) se localizó en CL3.

La acidez total fue sensible al ambiente como lo muestran los resultados contrastantes en el caso de radiación y temperatura. Mientras que las condiciones de PARH redujeron la acidez total, las condiciones de PARL la incrementaron (0.486 y 0.521 g de ácido cítrico/100 g FW, respectivamente) (Tabla IV.1). Watson et al. (2002) observaron una disminución en la concentración de sacarosa relacionada con la disminución en la radiación solar, un breve periodo de sombra redujo significativamente las concentraciones de sacarosa y glucosa en los frutos, tal comportamiento pudo llevar a un incremento en la concentración de los ácidos cítrico y málico. En condiciones de radiación normal los ácidos son sustratos para la respiración y sus niveles típicamente disminuyen durante la maduración. Las condiciones de TL incrementaron la acidez total en comparación con el tratamiento control (T3), mientras que TH redujo la acidez total. Garcia y Barrett (2006) encontraron que la acidez total en tomates fue mayor bajo regímenes de baja temperatura. Se ha observado también que la acidez disminuye en los frutos como resultado de la conversión de los ácidos en azúcares durante la respiración (Ball, 1997). En las condiciones de T4 el valor para la acidez total fue el menor. De acuerdo con Pila et al., (2010) la disminución en la acidez se atribuye a un incremento en la actividad de la enzima ácido cítrico glioxilasa debido al incremento en la concentración de AS.

Muchos estudios han reportado el efecto de la concentración de CO<sub>2</sub> sobre la calidad de los frutos de tomate. Islam et al. (1996) reportaron que las concentraciones de CO<sub>2</sub> elevadas mejoran la pigmentación del tomate. En nuestro estudio, la relación a\*/b\* (coloración rojiza) fue más alta bajo condiciones de COH (1100 ppm) que en las condiciones control (T3, 550 ppm) (Tabla IV.2). Woodrow et al., (1987) demostraron que el incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> produce un aumento en la acumulación de materia seca en tallo, raíces y hojas. Este efecto en el

metabolismo puede incrementar la acumulación en el fruto de tomate para producir azúcares, ácidos orgánicos y pectinas (Davies y Hobson, 1981). Estos componentes también contribuyen al desarrollo del color del tomate cultivado bajo condiciones de COH. El valor más alto para  $b^*$  se observó en el tratamiento T4, lo cual indica un posible retraso en la maduración del tomate debido al AS (Srivastava y Dwivedi, 2000), es posible que el color amarillo se relacione con un retraso en la acumulación de licopeno. Por otra parte, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos T4, TH, T1 y COL para el parámetro  $a^*$ .

Las propiedades sensoriales son muy importantes para la evaluación de la calidad de los vegetales por parte de los consumidores y de ello dependen sus preferencias. La calidad de los frutos cosechados es importante porque el fruto es clasificado de acuerdo a su apariencia externa (color, forma y características del pericarpio) o de características internas como sabor y textura (Guichard et al., 2001; Shi et al., 2002). Estudios previos han indicado que la calidad de los frutos y su producción son muy sensibles a las altas temperaturas durante su maduración (Gautier et al., 2005). En esta investigación, los descriptores relacionados con sabor y aroma no mostraron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos. Solo los atributos relacionados con la textura mostraron diferencias significativas. Por ejemplo, las condiciones del tratamiento T4 indujeron un incremento en la dureza externa y la dureza en la primera mordida comparadas con el resto de los tratamientos. El AS pudo retardar la maduración de los frutos, lo cual explicaría el incremento en la dureza interna comparado con el tratamiento control (T3). Se ha observado que el ácido salicílico retarda la maduración de otros frutos como el plátano. El ablandamiento de los frutos disminuyó en frutos tratados con AS comparados con los tratamientos control (Srivastava y Dwivedi, 2000). En contraste las condiciones de PARH produjeron los valores más bajos para ambos atributos. Existe evidencia de que el incremento en la producción de etileno seguida por estrés por radiación puede ser responsable del ablandamiento en frutos de tomate (Adegroye y Jolliffe, 2006).

La jugosidad tuvo una intensidad baja en el tratamiento control. No hubo diferencias significativas entre los tratamientos de AS. Se hallaron resultados contrastantes para COH y COL en el caso de la jugosidad, COL produjo un incremento en la intensidad de este atributo, mientras que las condiciones de COH causaron una reducción en su intensidad (Tabla IV.4). Esto puede ser provocado por un incremento en el contenido de almidón y azúcares en condiciones de

CO<sub>2</sub> elevado que también promueven una disminución en la tasa fotosintética. Lo anterior también sugiere que la biosíntesis de almidón actúa como un inhibidor por retroalimentación llevando a frutos más firmes y compactos en condiciones bajas de CO<sub>2</sub> (Yelle et al., 1989). Las condiciones en el tratamiento T3 también provocaron una reducción en la jugosidad del tomate. Este comportamiento puede explicarse por un retardo en la maduración del tomate (Srivastava y Dwivedi, 2000). A pesar de que muchos estudios han demostrado que la temperatura induce ablandamiento en los frutos (Greve et al., 1994; Lurie et al., 1996; Fraschina et al., 1998; Fleisher et al., 2006), en esta investigación no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de alta y baja temperatura para los descriptores de textura. Este efecto no es claro, por lo que es necesaria más investigación con la finalidad de establecer el posible papel del AS y como se relaciona con la temperatura y los cambios de textura.

Las intensidades promedio de los atributos de textura para cada tratamiento se muestran en la tabla IV.4. Las intensidades de estos atributos muestran diferencias significativas entre los tratamientos, para el atributo de dureza externa los valores oscilaron entre 4.89 a 6.37; dureza en la primera mordida entre 4.61 y 5.71, y finalmente el atributo de jugosidad los valores oscilaron entre 1.57 a 2.27. Aunque las condiciones 4n T4 tuvieron intensidades significativamente diferentes para dureza externa y dureza en la primera mordida no se observó lo mismo para jugosidad. Esta reducción en el ablandamiento de los frutos se indujo por el AS el cual puede controlar la producción de etileno (Babalar et al., 2007). Mediante la supresión de la producción de etileno se promueve un retardo en la maduración y ablandamiento del fruto, el AS puede extender la vida de anaquel de los tomates pues ayuda a mantener por más tiempo la integridad de la pared celular (Terry y Joyce, 2004; Waldron et al., 1997).

Los frutos tratados con CO<sub>2</sub> se vuelven más firmes en comparación con los frutos bajo condiciones normales, y son menos susceptibles a la descomposición (Harker et al., 2000). En contraste, los frutos en condiciones de COL en nuestra investigación mostraron valores más altos de jugosidad (tabla IV.4) o cual indica frutos suaves debido a las bajas concentraciones de CO<sub>2</sub>.

Con la finalidad de saber si las características de los tomates cultivados en cada tratamiento pueden agruparse, se aplicó el análisis de componentes principales PCA. Los resultados de este análisis se muestran en la figura IV.2B, se observa claramente la separación entre los clusters que agrupan tratamientos con característica similares. Cada cluster es claramente observable,

permitiendo distinguir entre los niveles alto y bajo de temperatura y CO<sub>2</sub>, así como los tratamientos de AS. Ambos niveles de PAR se agruparon en el CL1. Aplicando el PCA fue posible describir a los tomates cultivados en diferentes tratamientos mediante pocos atributos. Es claro que el tratamiento PAR en ambos niveles produjo un incremento en la jugosidad del mismo modo que lo hicieron TH y COL. Por otra parte, las concentraciones de AS 0 y 0.1 mM junto con TL y COH se caracterizaron por incrementar la dureza externa; la concentración más alta de AS (1.0 mM) produjo intensidades más altas de dureza en la primera mordida. El papel del AS en los cambios de textura requiere más investigación. De acuerdo con Zhang et al. (2003), el principal papel del AS ha sido el de retrasar la maduración del fruto y su ablandamiento reduciendo la actividad de las enzimas LOX y AOS, manteniendo la estabilidad de la pared celular, lo que conlleva a un incremento en la firmeza del fruto. Estos resultados pueden ser utilizados en posteriores estudios para comprender la importancia de las condiciones climáticas y la aplicación de AS en los cambios de textura y calidad de los frutos de tomate.

#### IV.4 Correlación del contenido de licopeno y $\beta$ -caroteno con los índices de color

El contenido promedio de licopeno y  $\beta$ -caroteno fue de 0 y  $1.15 \times 10^{-5}$  mg/ $\mu$ L, respectivamente durante la etapa de maduración verde, y la concentración final alcanzada en la etapa final de maduración fue de  $4.45 \times 10^{-5}$  y  $1.94 \times 10^{-5}$  mg/ $\mu$ L, para licopeno y  $\beta$ -caroteno, respectivamente. Se establecieron varias correlaciones entre el contenido de estos dos carotenoides con los índices de color medidos con el espectrofotómetro Minolta en cada una de las etapas de maduración. El contenido de licopeno y  $\beta$ -caroteno al correlacionarse con las etapas de maduración produjeron un alto coeficiente de regresión lineal y un mejor ajuste aún cuando se utilizó la regresión logarítmica (Fig. IV.7). El contenido de licopeno incrementó de  $2.49 \times 10^{-5}$  a  $4.45 \times 10^{-5}$  mg/ $\mu$ L y fue principalmente durante las primeras tres etapas de maduración, siendo significativamente diferentes. No hubo diferencias significativas en el contenido de licopeno en las etapas rosa, rojo ligero y rompiente, lo que sugiere que su síntesis puede considerarse constante entre estas etapas de maduración e incrementarse de manera importante en la etapa roja. El contenido de  $\beta$ -caroteno disminuyó durante todas las etapas de maduración debido al incremento en la biosíntesis de licopeno, ambas regresiones mostraron un mejor ajuste que en el caso del licopeno.

No hubo diferencias significativas en el contenido de  $\beta$ -caroteno entre las seis etapas de maduración (Fig. IV.8).

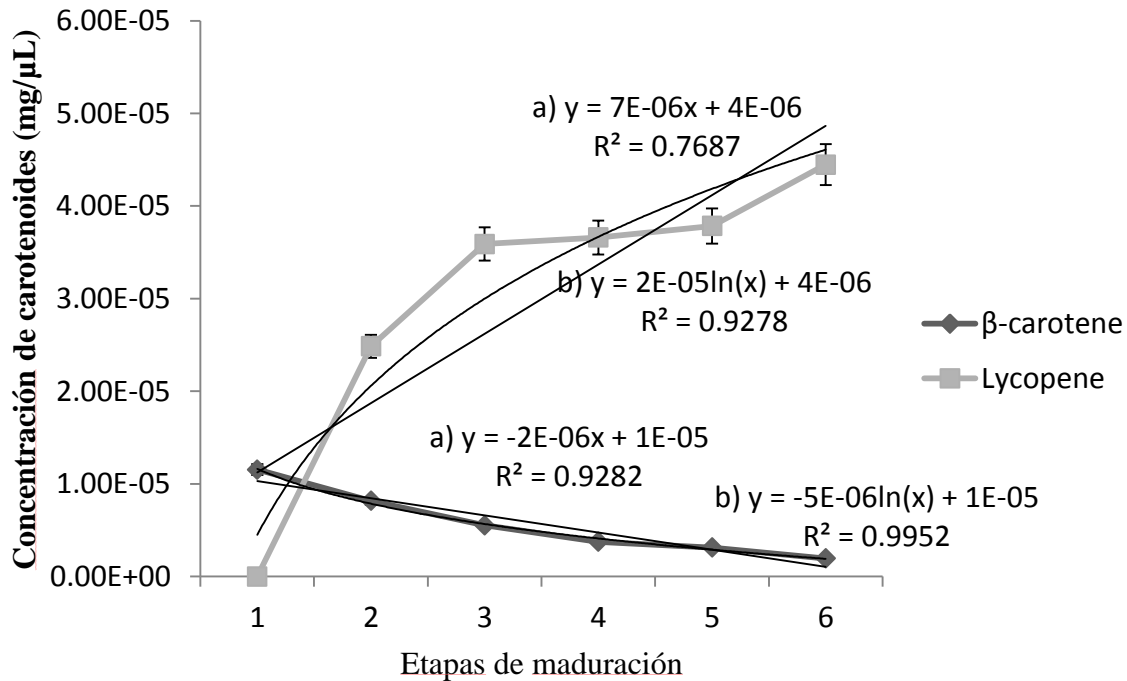


Figura IV.3 Regresión a) lineal y b) logarítmica del contenido de licopeno y  $\beta$ -caroteno en diferentes etapas de maduración

Los índices de color y el contenido de licopeno y  $\beta$ -caroteno no produjeron un buen ajuste (Tabla IV.3) aún cuando los diferentes índices mostraron un comportamiento al observado en otros estudios. Al incrementarse la concentración de licopeno, el índice  $L^*$  disminuyó y el color de los tomates cambió de un rojo ligero a un rojo oscuro. El aumento observado en la síntesis de licopeno al avanzar la madurez del tomate coincide con los datos de la literatura (Arias et al., 2000; Wold et al., 2004). El incremento de  $a^*$  está directamente asociado con la síntesis de licopeno, aunque las regresiones logarítmica y lineal no produjeron una buena correlación (Tabla IV.4).



Tabla IIV.4 Resumen de correlaciones y regresiones de los índices de color y el contenido de licopeno y  $\beta$ -caroteno en tomate

Factor	Regresión lineal R <sup>2</sup>	Regresión logarítmica R <sup>2</sup>	Coeficiente de correlación		p-value
			Lineal	Logarítmica	
<b>Licopeno</b>					
L*	0.528	0.435	-17.71	-0.067	<0.0001
a*	0.506	0.187	29.29	0.319	<0.0001
b*	0.015	0.091	-29.98	-0.043	0.0047
a*/b*	0.608	0.247	10.92	0.413	<0.0001
(a*/b*) <sup>2</sup>	0.685	0.23	89.68	0.848	<0.0001
Hue	0.173	0.416	15.84	-0.127	<0.0001
<b><math>\beta</math>-caroteno</b>					
L*	0.403	0.663	62	0.106	<0.0001
a*	0.445	0.36	-1.1	-0.69	<0.0001
b*	0.093	0.099	-29.43	-0.062	<0.0001
a*/b*	0.433	0.382	-36.89	-0.768	<0.0001
(a*/b*) <sup>2</sup>	0.171	0.23	-17.97	-0.913	<0.0001
Hue	0.358	0.429	-91.08	0.151	<0.0001

El valor b\* tampoco produjo una buena correlación y junto con los otros parámetros no puede utilizarse para predecir el contenido de licopeno y  $\beta$ -caroteno de los tomates durante su maduración. Los valores a\*/b\* y (a\*/b\*)<sup>2</sup> mostraron los valores de R<sup>2</sup> más altos para el licopeno y  $\beta$ -caroteno en las regresiones, pero estos valores no son confiables para propósitos de predicción debido a los bajos coeficientes de correlación, D'Souza (1992) halló un comportamiento opuesto al generar ecuaciones de regresión a partir de estos valores para estimar el contenido de licopeno.

Los índices de color obtenidos mediante el espectrofotómetro no pudieron utilizarse para predecir el contenido de licopeno y  $\beta$ -caroteno debido a los cambios de color en la superficie de las muestras de tomate. Esta falta de ajuste puede resolverse utilizando otras herramientas como las redes neuronales, estos algoritmos pueden manejar la alta no linealidad que existe en el comportamiento observado entre la concentración de licopeno y  $\beta$ -caroteno y los índices de color medidos a lo largo de las diferentes etapas de maduración.

## IV.5 Análisis de sensibilidad del modelo TOMGRO

Actualmente existe un creciente interés en el adecuado control climático de los invernaderos para incrementar la producción de las hortalizas (Bakker et al., 1995). En esta tarea, el principal problema es el entendimiento de las respuestas de la planta a su ambiente y el carácter dinámico de las mismas a través del tiempo. Debido a tales complejidades se han desarrollado muchos modelos matemáticos para hortalizas durante las últimas dos décadas para simular el crecimiento y desarrollo de hortalizas como el tomate (Cooman y Schrevens, 2006). Sin embargo, la mayoría de los modelos para hortalizas son muy complejos para su uso en control de invernaderos debido a la gran número de variables y parámetros involucrados. Un ejemplo es el modelo TOMGRO versión 1.0 que cuenta con 69 variables de estado (Jones et al., 1991), y el TOMGRO versión 3.0 con 574 variables de estado (Kenig y Jones, 1997). Jones et al. (1999) simplificaron el TOMGRO a solo cinco variables de estado: peso seco total,  $W$ , peso seco total de frutos,  $W_F$ , peso seco total de frutos maduros,  $W_M$ , número de nodos e índice de área foliar, LAI (Vazquez-Cruz et al., 2010).

La aplicación de este modelo implica la estimación de parámetros para condiciones específicas de crecimiento así como para la variedad que se esté empleando si se desea emplear el modelo para estimar crecimiento (Jones et al., 1991). Es importante tomar en cuenta para cualquier experimento que llevemos a cabo que algunos de las variables de entrada y los parámetros producirán cierta incertidumbre en el modelo ya que comúnmente las mediciones acarrear ciertos errores debido a la variabilidad natural en los procesos fisiológicos, los costos de monitores o las imperfecciones al realizar las mediciones (Saltelli, 2000). Por lo tanto, cualquier estimación obtenida mediante modelos no es la respuesta absoluta, y en la mayoría de los casos es preferible proporcionar intervalos de confianza para las estimaciones debido a la incertidumbre tanto en la estructura como en los valores de entrada del modelo (Haan, 2002; Saltelli, 2000). Las diferentes versiones del modelo TOMGRO utilizan un número importante de parámetros para describir los diferentes procesos de crecimiento de la planta y desarrollo del fruto. La versión reducida del modelo TOMGRO utiliza 29 parámetros. Conforme aumenta el número de parámetros la incertidumbre en las predicciones del modelo se vuelve más importante. Bajo tales condiciones, es importante determinar los parámetros dominantes del

modelo (Cooman y Schrevens, 2006). Por esto, el análisis de sensibilidad es el primer paso para elucidar el role de los diferentes parámetros en las estimaciones del modelo (Cooman y Schrevens, 2007; Linker et al., 2004; van Straten et al., 1999). El análisis de sensibilidad evalúa la importancia relativa de las variables de entrada y los parámetros en la evolución en el tiempo de las variables de estado del modelo (Saltelli, 2000). De aquí surge la calibración, otro tema importante y de considerable interés que debe realizarse para ajustar los parámetros y obtener un buen ajuste entre las estimaciones del modelo y los datos medidos (Acutis y Confalonieri, 2006). Debido a que hay muchos parámetros para calibrar en un modelo, una pregunta inmediata que surge es cuáles parámetros se deben seleccionar para la calibración (van Straten et al., 2011). El objetivo de la calibración es aplicar el modelo bajo condiciones similares a aquellas bajo las cuales se obtuvieron los datos utilizados en la calibración (Acutis y Confalonieri, 2006). La calibración del modelo debe formularse como un problema de optimización, y por lo tanto, existen diferentes métodos para solucionarlo. Recientemente, han sido aplicados métodos evolutivos, en particular los algoritmos genéticos (AGs) para realizar el proceso de calibración (Guzman-Cruz, 2009; Herrero, 2007).

En reportes formales de calibración del modelo TOMGRO reducido, el análisis de sensibilidad ha sido omitido, la variabilidad de los parámetros del modelo bajo diferentes condiciones ambientales no ha sido analizada. In dichos trabajos los parámetros del modelo se consideran fijos o el algoritmo del modelo es modificado para lograr la suficiente precisión en las estimaciones (Bacci et al., 2012). Uno de los objetivos de este trabajo fue realizar el análisis de sensibilidad de las variables de estado respecto a los parámetros del modelo TOMGRO reducido para un cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero utilizando los métodos FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test) y Sobol' para comparar los diferentes resultados.

#### **IV.5.1 Análisis de sensibilidad con el método FAST**

Los índices de sensibilidad calculados por el método FAST se muestran en la Fig. IV.4. para las cinco variables de estado al final del ciclo de cultivo (105 días). Los parámetros más importantes fueron tasa máxima de aparición de nodos ( $N_m$ ), tasa máxima de desarrollo de área

foliar por nodo ( $\delta$ ), relación entre biomasa y fotosintatos disponibles para el crecimiento (E), coeficiente de conversión de  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_2\text{O}$  (D), coeficiente de particionamiento de biomasa dependiente de la etapa de desarrollo de la planta (fcN), factor de reducción de fotosíntesis ( $\phi_h$ ), nodos por planta cuando el primer fruto aparece ( $N_{\text{FF}}$ ) y eficiencia de la utilización de radiación ( $\alpha$ ). La suma de los índices de primer orden y de orden total fue mayor a 1.0 para todas las variables de estado lo cual indica que el modelo TOMGRO reducido es un modelo no aditivo. Para la variable de estado número de nodos (N), de acuerdo con los resultados del FAST,  $N_m$  mostró índices de sensibilidad de primer orden ( $S_i$ ) y orden total ( $S_{Ti}$ ) de 0.9918 y 1.0, respectivamente. Para la variable de estado índice de área foliar (LAI)  $N_m$  también mostró índices de sensibilidad altos (0.7057 y 0.7173, respectivamente) seguido por  $\delta$  con 0.2841 y 0.2922, respectivamente. Para el peso seco total (W) y peso seco de frutos ( $W_F$ ) el parámetro más sensible fue fcN con índices de sensibilidad de 0.8425 y 0.8175, respectivamente, seguido por el parámetro  $N_m$ . La variable peso seco de frutos maduros fue más sensible a fcN (índices de 0.6249 y 0.6689), seguido por  $N_m$ ,  $N_{\text{FF}}$ ,  $\phi_h$ , y  $\alpha$ . Por definición  $S_{Ti} \geq S_i$  y  $S_{Ti} - S_i$  es una medida de cuanto el parámetro  $X_i$  toma parte en las interacciones con otros parámetros. Para todos los parámetros antes mencionados las diferencias entre  $S_{Ti}$  y  $S_i$  fueron diferentes de cero, lo cual indica que dichos parámetros toman parte en interacciones. Sin embargo, los parámetros más importantes fueron fcN,  $N_m$ ,  $N_{\text{FF}}$  y E que mostraron los valores  $S_{Ti}-S_i$  más altos (0.0985, 0.0846, 0.0531 y 0.0422, respectivamente), lo cual indica que por sí solos explican la mayor parte de la variabilidad en las salidas del modelo TOMGRO de acuerdo al análisis llevado a cabo mediante el método FAST. Con la finalidad de establecer comparaciones en la sensibilidad del modelo también se llevó a cabo un análisis con el método de Sobol'.

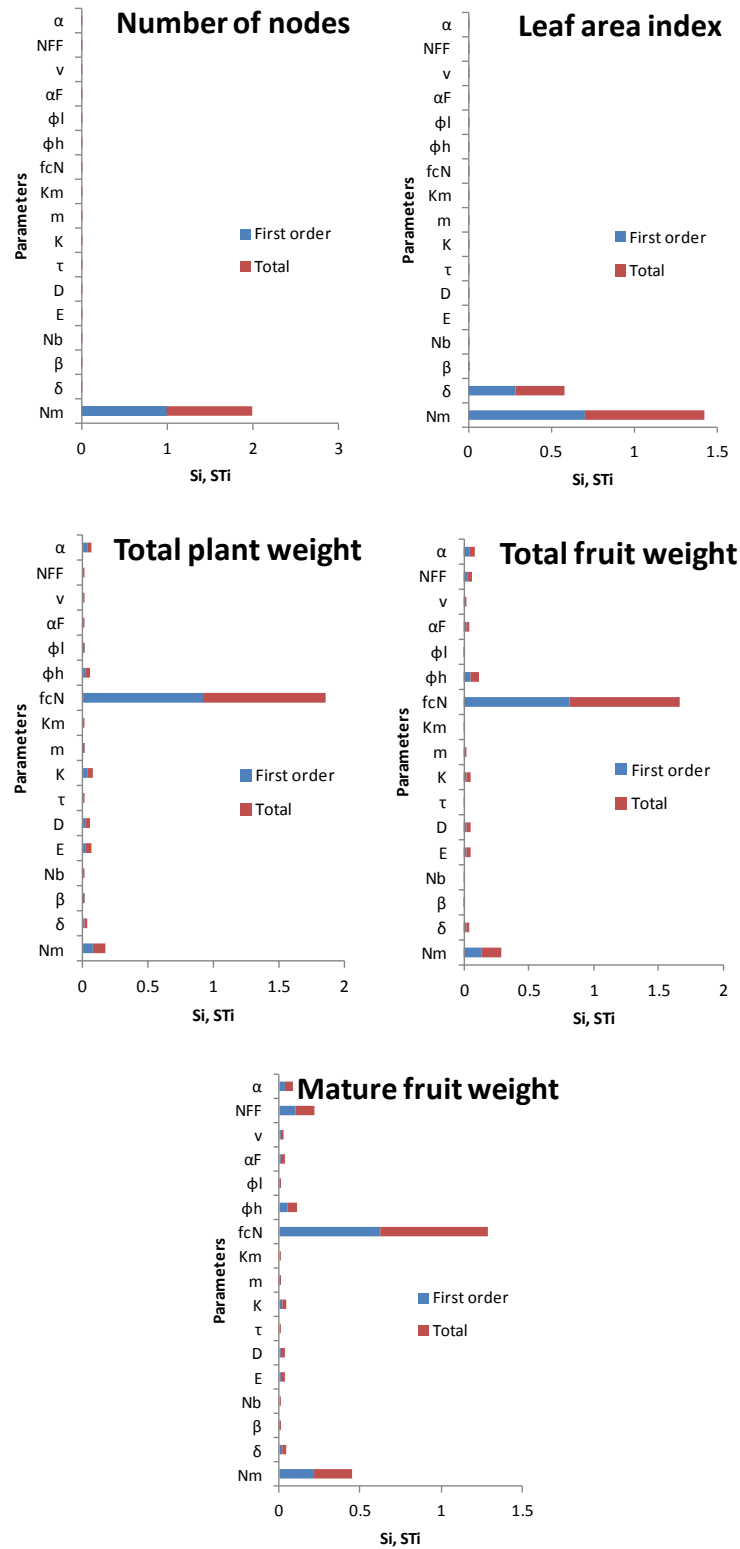


Figura IV.4 Índices de sensibilidad global obtenidos mediante el método FAST para las variables de estado del modelo TOMGRO

#### IV.5.2 Análisis de sensibilidad con el método de Sobol'.

El método de Sobol' (Sobol', 1993; Sobol', 1990) es un análisis de sensibilidad global que se basa en la descomposición de la varianza. Puede manejar funciones y modelos no lineales y no monotónicos. EL método de Sobol' ha sido utilizado para cuantificar la sensibilidad de un modelo y la interacción de parámetros en modelación funcional-estructural de hortalizas como maíz, caña de azúcar, girasol, tomate, uva, arroz, entre otras (DeJonge et al., 2012; Cournede, et al., 2011; Confalonieri et al., 2010). La sensibilidad de cada parámetro o las interacciones entre ellos son evaluadas con base en su contribución a la varianza total calculada usando un modelo de distribución de respuestas (Tang et al., 2007).

La figura IV.10 muestra los índices de sensibilidad de primer orden ( $S_i$ ) y de orden total ( $S_{Ti}$ ), que son el principal resultado arrojado por el método de Sobol'. Estos índices son idénticos en significado a los producidos por el método FAST, indican la contribución de cada parámetro a la varianza total del modelo (Nossent et al., 2011; Archer et al., 1997). Los índices de orden total son las medidas más acertadas para la sensibilidad de los parámetros ya que representan la suma de la contribución total del parámetro a la varianza del modelo (su contribución de primer orden más todas sus interacciones con los demás parámetros) (Tang et al., 2007). Debe notarse que el truncado y las aproximaciones mediante el método de Monte Carlo requeridas por el método de Sobol' puede llevar a pequeños errores numéricos (Fieberg and Jenkins, 2005; Sobol', 2001) como valores ligeramente negativos que pueden apreciarse en las variables de estado índice de área foliar, peso seco total, peso seco de frutos totales y peso seco de frutos maduros (Fig. IV.5). En este estudio estos efectos fueron muy pequeños y no impactaron de manera importante en el análisis de los parámetros.

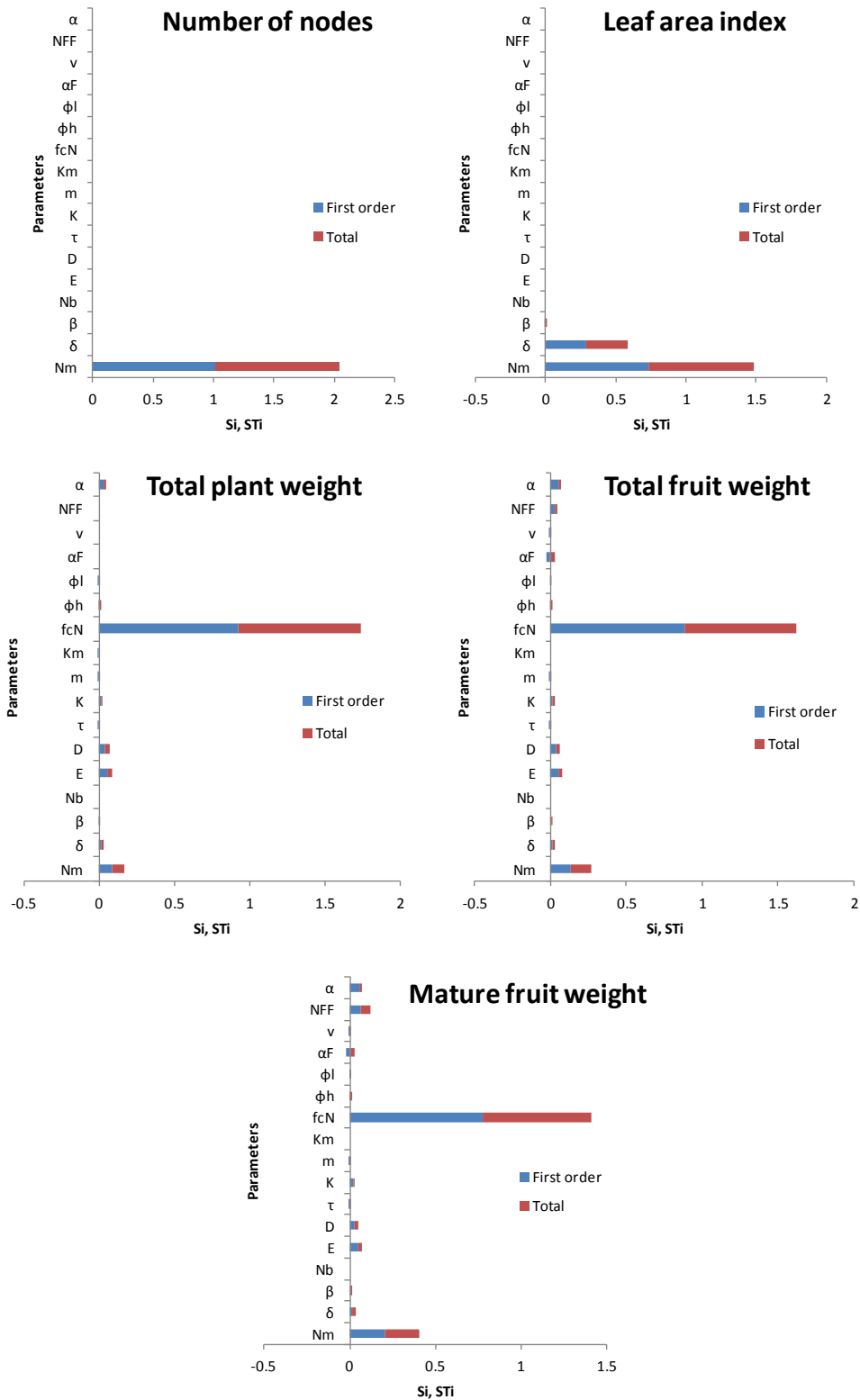


Figura IV.5 Análisis de sensibilidad global estimados mediante el método de Sobol' para las variables de estado del modelo TOMGRO reducido

La sensibilidad de cada variable de estado respecto a los parámetros se muestra en la figura IV.10. Para la variable número de nodos el único parámetro que mostró sensibilidad fue  $N_m$ . Es claro que para LAI el parámetro más sensible es por mucho  $N_m$  seguido por  $\delta$ . Para el peso seco total, peso seco de frutos totales y peso seco de frutos maduros el parámetro más importante fue  $fcN$ , los valores de  $S_i$  para este parámetro fueron más elevados comparados con  $S_{Ti}$  lo cual indica que este parámetro es un candidato importante para ser calibrado y reducir la incertidumbre en las estimaciones del modelo TOMGRO reducido. El mismo comportamiento fue observado para  $N_m$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $N_{FF}$  y  $\alpha$  indicando que estos parámetros explican gran parte de la varianza en las estimaciones del modelo TOMGRO.

La suma de los índices de sensibilidad también indicaron que el modelo TOMGRO reducido es no aditivo. Los valores de  $S_i$  fueron más altos que los de  $S_{Ti}$  para todos los parámetros lo cual sugiere que estos parámetros son importantes para la varianza en las estimaciones del modelo TOMGRO.

### **IV.5.3 Calibración del modelo TOMGRO mediante algoritmos evolutivos**

La calibración de los parámetros se realizó mediante algoritmos genéticos (GAs). Los parámetros fueron seleccionados después de realizar un análisis de sensibilidad mediante los métodos FAST y Sobol' con datos registrados durante un ciclo de cultivo de tomate en condiciones de invernadero durante 120 días.

Los resultados del método EFAST indicaron que sólo 6 parámetros influyeron de manera importante las salidas del modelo TOMGRO, siendo  $N_m$ ,  $\delta$ ,  $fcN$ ,  $N_{FF}$ ,  $\alpha$  y  $K$  los parámetros más importantes. Por otro lado, el método Sobol' señaló 7 parámetros como los más importantes:  $N_m$ ,  $\delta$ ,  $E$ ,  $D_F$ ,  $fcN$ ,  $N_{FF}$ , y  $\alpha$ . El conjunto final de parámetros se obtuvo al combinar los resultados obtenidos mediante ambos métodos con la finalidad de calibrar y mejorar las estimaciones del modelo TOMGRO, los parámetros finales fueron:  $N_m$ ,  $\delta$ ,  $E$ ,  $D_F$ ,  $fcN$ ,  $N_{FF}$ ,  $\alpha$ , y  $K$ . La etapa de reducción de parámetros realizada durante la validación tuvo el propósito de mejorar el desempeño del modelo bajo las condiciones climáticas y de manejo consideradas en



este estudio. Es difícil lograr un buen ajuste para varias variables de estado a la vez, el modelo TOMGRO reducido cuenta con 5 variables de estado lo cual incrementó la dificultad de la labor. Así que se requiere un proceso de calibración, dicho proceso se realizó mediante algoritmos genéticos (AGs) (método de búsqueda global). La tabla IV.5 muestra los valores de los parámetros antes y después de la calibración, la variación entre los valores tomados como referencia y los calibrados obedece a que los valores originales fueron tomados como referencia de estudios hechos para cultivo de tomate en Europa y Estados Unidos de América. Las condiciones de invernadero también fueron muy diferentes por lo que las condiciones de control climático en el invernadero también lo fueron.

**Tabla IIV.5 Valores de los parámetros antes y después de la calibración mediante AGs**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor original</b>	<b>Valor después de la calibración</b>
$N_m$	0.495	0.4039
$\delta$	0.041	0.0875
E	0.70	2.0663
$D_F$	0.108	0.3170
$f_cN$	0.85	0.8250
$N_{FF}$	14.88	4.0116
$\alpha$	0.056	0.0280
K	0.58	0.3888

Las estimaciones hechas por el modelo antes de la calibración se muestran en la figura IV.6. Debido a la falta de ajuste con los datos experimentales decidimos realizar un análisis de sensibilidad. Es fácil apreciar las pobres estimaciones de todas las variables de estado. En la tabla IV.6 se muestran todos los indicadores estadísticos del ajuste antes y después de la calibración con la finalidad de comparar resultados. Los resultados para los AGs fueron alcanzados después de 20 corridas y la selección fue hecha considerando los valores de los parámetros que minimizaban el error entre los datos medidos y los datos simulados.

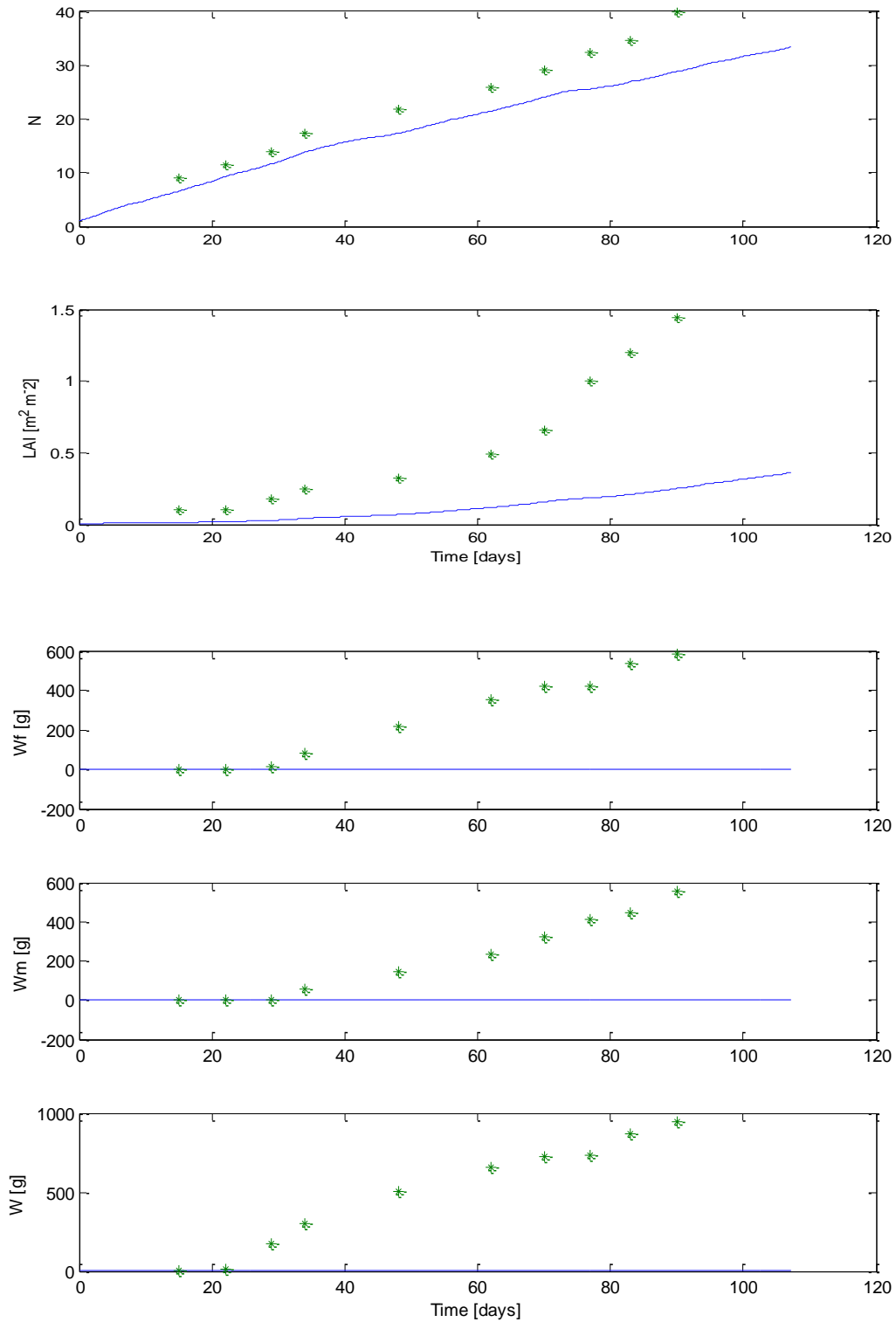


Figura IV.6 Datos medidos (línea punteada) y simulados (línea continua) antes de la calibración de parámetros para las 5 variables de estado

**Tabla IIV.6 Indicadores estadísticos para las cinco variables de estado del modelo TOMGRO antes y después de la calibración usando AGs para reducir el valor entre los datos observados y medidos**

	N		LAI		W		W <sub>F</sub>		W <sub>M</sub>	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
<i>%SEP</i>	24.20	10.23	104.51	16.07	120.36	1.20	129.480	9.334	135.12	18.48
<i>ARV</i>	0.330	0.059	1.696	0.105	3.213	0.00032	2.478	0.012	2.210	0.041
<i>E</i>	0.669	0.940	0.696	0.894	2.213	0.999	1.478	0.987	1.210	0.958
<i>R<sup>2</sup></i>	0.985	0.991	0.967	0.964	0.886	0.983	0.646	0.994	0.374	0.976
<i>RMSE</i>	0.59 (104.35%)	2.41 (10.21%)	5.70 (24.16%)	0.149 (25.95%)	592.52 (120.36%)	100.74 (20.46%)	341.22 (129.48%)	24.59 (9.33%)	292.62 (135.12%)	40.02 (18.48%)

Resulta claro que los resultados obtenidos mediante la calibración fueron mejores como lo indican los valores estadísticos. Después de la calibración *%SEP* and *ARV* estuvieron más cerca de 0 así como también *E* y *R<sup>2</sup>* estuvieron más cerca de 1.0 para todas las variables de estado. La información dada por *R<sup>2</sup>* no es tan clara por si sola, porque a pesar de que su valor es muy similar antes y después de la calibración los otros indicadores mostraron que las 5 variables de estado fueron subestimados de acuerdo a la figura IV.6. Los indicadores estadísticos que mostraron una mejoría más importante fueron *%SEP* y *ARV* con reducciones importantes en todas las variables, reducciones de 58%, 85%, 99%, 92%, y 86% fueron alcanzadas para N, LAI, W, W<sub>F</sub>, and W<sub>M</sub>, respectivamente para el *%SEP*.

También se observaron disminuciones importantes para el *ARV* en todas las variables de estado recalando la importancia del proceso de calibración en el desempeño del modelo. Los valores para el coeficiente E variaron entre 0.89 y 0.99 después de la calibración (Tabla IV.6). La figura IV.7 muestra los resultados del ajuste del modelo TOMGRO reducido después de la calibración, es evidente la mejoría lograda mediante los AGs, aunque el LAI fue sobre-estimado entre los días 40 al 80 los datos estadísticos mostraron que se puede considerar una buena estimación para propósitos prácticos. Para el número de nodos (N) sucedió lo opuesto mostrando una pequeña sub-estimación alrededor del 10% respecto a los datos observados (Figura IV.7). Los valores estimados de peso seco de planta, peso seco de frutos totales y peso seco de frutos maduros presentaron el mejor ajuste de acuerdo a las figura IV.7 y los datos estadísticos.

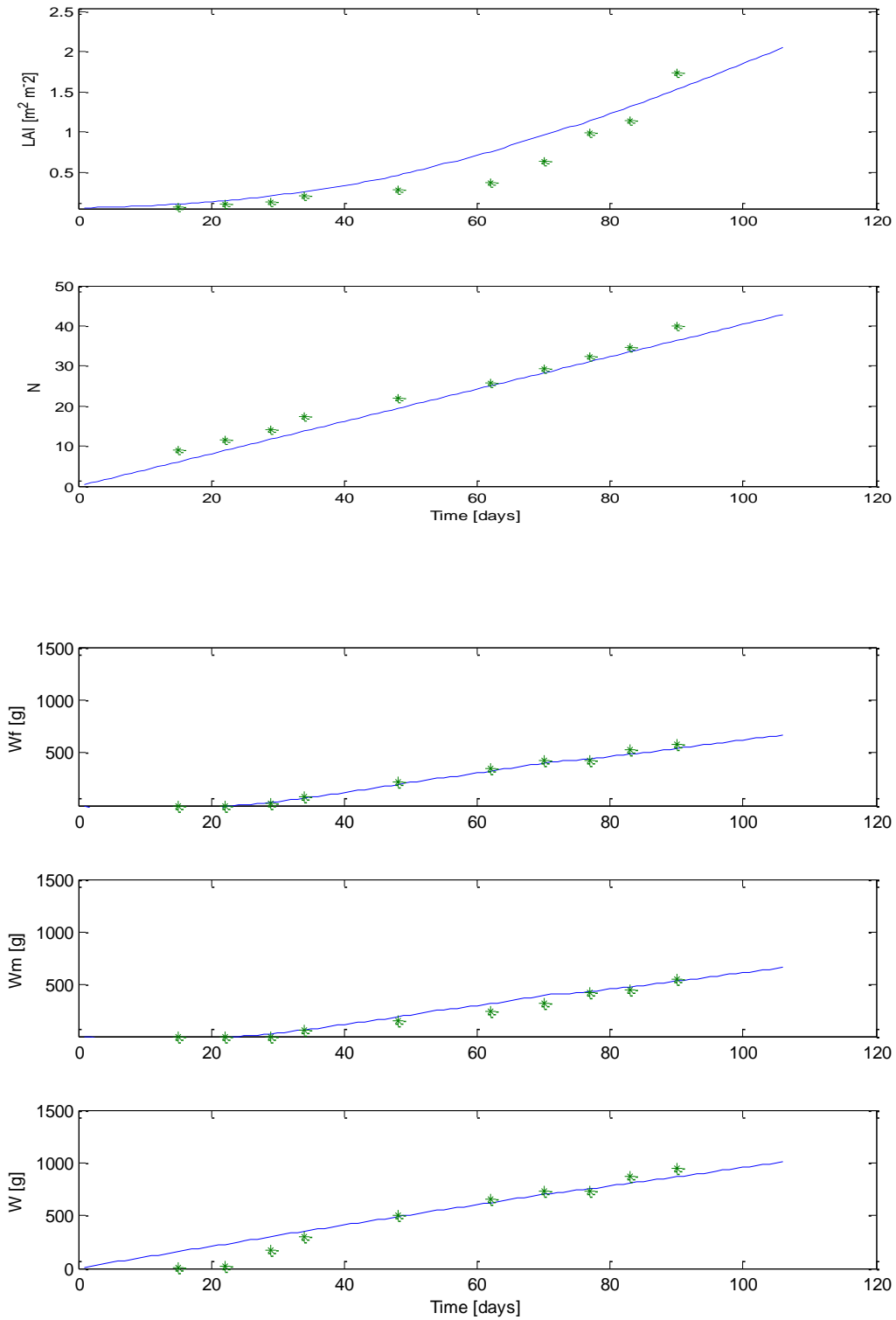


Figura IV.7 Datos medidos (línea punteada) y simulados (línea sólida) después de la calibración para las cinco variables de estado del modelo TOMGRO reducido

Los algoritmos genéticos demostraron ser una herramienta útil para desarrollar tareas de calibración con un costo computacional aceptable, utilizando una notebook DELL® XPS L502X equipada con un procesador de 2.40 GHz Intel® Core i5 y una memoria RAM de 4.00 Gb una corrida de los AGs se realizó en 4 min, los mayores requerimientos computacionales se requirieron para los análisis de sensibilidad, cada corrida tomó cerca de 20 min.

Los resultados de las simulaciones fueron comparados contra las mediciones experimentales obtenidas a partir del cultivo de tomate. Las fechas muestreadas fueron desde los 15 hasta los 90 días después del trasplante. El LAI observado varió entre 0.10 y 1.44 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, los valores simulados correspondientes variaron entre 0.10 y 1.52 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>.

El número de nodos simulado no fue significativamente diferente comparado con los valores observados durante todo el ciclo de cultivo, tuvo un RMSE = 2.41 nodos (10.21% de la media observada). Las mejores estimaciones del modelo se observaron en peso seco de frutos totales ( $W_F$ ) y peso seco de frutos maduros ( $W_M$ ), tal como lo muestran los valores altos de  $E$ , 0.98 y 0.95, respectivamente. El RMSE para  $W_F$  fue 24.59 g (9.33% de la media observada) y para  $W_M$  fue de 40.02 g (18.48% de la media observada). El peso seco total de la panta medido fue un tanto sobre-estimado durante los primeros 29 días después del trasplante, aunque durante el resto del ciclo de cultivo las estimaciones del modelo se ajustaron adecuadamente a los correspondientes valores observados, esta variable mostró un RMSE = 100.74 g (20.46% de la media observada) que fue el valor más alto entre los pesos secos. Esta sobre-estimación pudo deberse a que los parámetros no describieron el efecto de aclimatación de las plantas de tomate a las condiciones del invernadero después del trasplante de las plántulas (Besford et al., 1990). En general el modelo estimó razonablemente los pesos secos durante todo el ciclo de cultivo. Después de la calibración los valores de RMSE disminuyeron significativamente para  $W$ ,  $W_F$ , and  $W_M$  siendo 100.74, 24.59, and 40.02 g respectivamente, cada uno se mantuvo por debajo del 20% de la media observada (Tabla IV.6).

La necesidad de modelos ecofisiológicos relacionados con la calidad del fruto es cada vez más importante (Génard et al., 2007) y los modelos han demostrado ser herramientas muy útiles para el entendimiento de sistemas complejos y puntualizar procesos clave o etapas de desarrollo involucradas en el control de rasgos importantes como lo es la calidad. La aplicación del modelo matemático regularmente se obstaculiza por el hecho de que una apropiada calibración es bastante laboriosa debido a la gran cantidad de simulaciones de prueba que deben realizarse y se requiere una gran cantidad de

datos experimentales para establecer relaciones funcionales adecuadas (Dayan et al., 1993). En esta investigación dos métodos de análisis de sensibilidad fueron llevados a cabo para seleccionar los parámetros del modelo más sensibles y ser estimados mediante un proceso de calibración. En el cultivo del tomate bajo condiciones de invernadero, el modelo TOMGRO de Jones et al (1991) fue pionero en la modelación de crecimiento y producción de tomate mediante cálculos básicos como fotosíntesis, respiración, desarrollo de nodos y expansión del área foliar y de algunas variables de entrada como la temperatura, radiación y concentración de CO<sub>2</sub>. Desde su desarrollo para el fruto de tomate, el carácter genérico de este modelo ha sido evaluado en pimiento (*Capsicum annum* L.) con pequeñas modificaciones (Hernández-Hernández et al., 2011) y el modelo fue capaz de estimar el desarrollo del pimiento bajo condiciones de invernadero en la región central de México. En esta investigación se llevó a cabo el análisis de sensibilidad y la correspondiente calibración del modelo TOMGRO reducido para ser adaptado a condiciones de cultivo en invernadero de la región central de Querétaro.

Los valores iniciales para los parámetros del modelo fueron tomados de Jones et al. (1991), después del análisis de sensibilidad se identificaron 8 parámetros como los más sensibles, dichos parámetros fueron calibrados para las simulaciones con el modelo. Con ambos métodos los índices de sensibilidad variaron de 0 a 2.5. Como resultado de este análisis, los parámetros relacionados con la partición de biomasa mostraron una alta sensibilidad. A pesar de la alta sensibilidad del modelo al parámetro  $fcN$  (coeficiente de partición de biomasa dependiente de a etapa de desarrollo) se pudo alcanzar un valor constante para simular todos los datos experimentales. Al comparar el ajuste para las cinco variables de estado, el ajuste para LAI es menor debido probablemente a la estimación del área foliar mediante procesamiento de imágenes. Aunque la sensibilidad de  $\beta$  en ambos métodos es casi despreciable para cada una de las variables de estado (Figuras IV.9 y IV.10), durante la etapa de fijación de factores, se notó que para LAI pequeños cambios en este parámetro producían sub- o sobre-estimaciones de esta variable durante todo el ciclo de cultivo. EL valor propuesto por Jones et al. (1991) para este parámetro fue de 0.169. En esta investigación el valor para este parámetro fue fijado en 0.158 para las condiciones climáticas usadas en invernadero en la región central de Querétaro. Hernández-Hernández et al. (2011) estimó un valor de 0.32 para este parámetro al aplicarlo al cultivo de pimiento. También los parámetros  $D_F$  y  $E$ , relacionados con la eficiencia de crecimiento, mostraron índices de sensibilidad altos, después de la calibración los valores fueron 0.31 y 2.06, respectivamente. Estos valores fueron mayores que los propuestos por Jones et al. (1999), 0.108 y 0.70, respectivamente. Al parecer los frutos maduros se desarrollaron más rápido como lo sugiere el valor de  $D_F$  y  $E$ . El área foliar simulada

fue ligeramente más alta que la observada, esto se aprecia en el procedimiento de ajuste para el parámetro  $\delta$  del LAI cuyo valor fue dos veces mayor que el propuesto por Jones et al. (1999) (Tabla IV.5). Las temperaturas durante todo el ciclo de cultivo fueron altas, el valor de  $T_{CRIT}$  no causó sensibilidad en el modelo por lo que fue incrementado de 24.0 hasta 28.0, lo que implica que la variedad cultivada bajo estas condiciones fue más resistente a las altas temperaturas. Rainwater et al. (1996) encontraron que la producción de una variedad de tomate sensible a altas temperaturas fue reducida hasta en un 79% cuando se exponía a altas temperaturas (temperaturas promedio de 34 °C) mientras que la producción de otras variedades sólo se reducía entre un 25 y 51%.

Los resultados para las variables  $W_F$  y  $W_M$  fueron muy bien descritos por el modelo después de la calibración como se muestra en la figura IV.12 y como lo indican los valores de RMSE antes y después de la calibración (Tabla IV.6). Los valores de RMSE estuvieron alrededor de 9.33% y 18.48% de los valores promedio observados. Uno de los parámetros importantes para la estimación de desarrollo de frutos fue  $N_{FF}$ . La variedad estudiada en esta investigación tuvo frutos grandes ( $N_{FF} = 4.01$ ) comparados con las variedades estudiadas por Jones et al. (1999).

En conclusión, el análisis de sensibilidad global basado en los métodos EFAST y Sobol' permitieron la determinación de los parámetros más sensibles del modelo TOMGRO reducido. Los resultados encontrados con el método EFAST mostraron valores  $S_{Ti}$  más altos indicando que todos los parámetros contribuyeron a la variación total del modelo en conjunto. Por otra parte, el método Sobol' produjo valores  $S_i$  más altos lo que sugiere que este método remarca aquellos parámetros que deben ser calibrados para reducir la incertidumbre en las estimaciones del modelo. El modelo TOMGRO reducido fue capaz de simular crecimiento y producción de tomate en condiciones de invernadero usando las condiciones descritas en este artículo. La calibración produjo información valiosa acerca de la importancia de las condiciones de clima y manejo de la planta en relación al desempeño del modelo, el índice de área foliar (LAI) fue la variable cuyo ajuste fue el más bajo entre las cinco variables de estado. Lo anterior pudo deberse a la metodología de adquisición del área foliar la cual pudo presentar variaciones entre muestra y muestra. El modelo TOMGRO reducido puede ser utilizado en su formato actual para simular crecimiento y producción de tomate bajo condiciones de invernadero similares a las de la región Central de México. Los valores encontrados para los parámetros del modelo se pueden emplear para simular otros cultivos de invernadero como el pimiento, siempre y cuando no haya

limitaciones de agua y nutrientes. Sin embargo, se requiere trabajo adicional para probar esta posibilidad bajo condiciones de clima variable en invernadero en distintas locaciones.

#### **IV.5.4 Correlación de la concentración de licopeno, $\beta$ -caroteno y variables fisicoquímicas con el contenido de materia seca de frutos maduros**

El principal objetivo de esta investigación fue generar un modelo matemático que, además de estimar producción y crecimiento, fuera capaz de estimar rasgos específicos que ayuden a describir la calidad del tomate como: contenido de carotenoides (licopeno y  $\beta$ -caroteno), azúcares y aspectos sensoriales como la intensidad de su dulzura (relación ácido/dulce). El modelo TOMGRO reducido permite estimar producción de frutos maduros a partir de la acumulación de materia seca (relacionada con temperatura, PAR y CO<sub>2</sub>), pero no estima calidad del fruto en ningún momento. Es así que se decidió como primera aproximación buscar una correlación entre el peso seco de frutos maduros y la biosíntesis de carotenoides durante la maduración del fruto de tomate. La maduración del fruto de tomate comprende seis etapas, en cada una de ellas se midieron las concentraciones de licopeno y  $\beta$ -caroteno mediante HPLC.

La maduración del fruto de tomate es un proceso regulado durante el cual el color, sabor, aroma y textura cambian de manera coordinada. Una de las características más notables de la maduración es el incremento en el contenido de carotenoides en el fruto (Fraser et al., 1994). El cambio en la pigmentación se debe a una acumulación masiva de licopeno y la desaparición de clorofila. Los cloroplastos del fruto verde cambian a cromoplastos, los cuales acumulan licopeno. Este fenómeno pudo apreciarse claramente conforme el tomate alcanzó cada una de las etapas de maduración (Tabla V.7). La concentración de licopeno en la etapa verde (C1), no presentó licopeno, la coloración verde se debe a la abundancia de clorofila, la cual servirá como materia prima para la biosíntesis de licopeno. En tomate, el contenido total de carotenoides incrementa entre 10 y 15 veces durante la maduración del fruto. Este cambio se produce principalmente a un incremento de 500 veces la concentración del licopeno (Fraser et al., 1994). La acumulación del licopeno comienza en la etapa de maduración rompiente (C2).



Tabla IV.7 Concentración de licopeno y  $\beta$ -caroteno (ppm) durante las diferentes etapas de maduración

Etapa de maduración	Licopeno (ppm)			B-caroteno (ppm)		
	Media	Desviación estándar		Media	Desviación estándar	
C1	0.00	0.00	c	0.13	0.21	b
C2	4.39	8.14	c	0.65	0.63	b
C3	12.73	9.31	c	2.11	1.39	b
C4	27.89	14.80	bc	4.65	4.00	b
C5	48.82	25.79	b	8.69	4.64	b
C6	84.69	45.74	a	20.90	15.36	a

\*Los niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes (Tukey HSD  $p < 0.05$ )

La presencia del  $\beta$ -caroteno desde las primeras etapas de maduración pudo deberse a la conversión de neurospreno a  $\beta$ -zeacaroteno, el cual a su vez forma  $\gamma$ -caroteno que se isomeriza a  $\beta$ -caroteno, y la alta acumulación de licopeno de  $\beta$ -caroteno después de la etapa rojo ligero (C5) puede ser atribuida a las reacciones simultáneas de conversión de licopeno y  $\gamma$ -caroteno a  $\beta$ -caroteno. Siguiendo la síntesis de  $\beta$ -caroteno, se esperaba que la concentración de este compuesto fuera baja en un inicio y la concentración de licopeno fuera alta en caso de que el  $\beta$ -caroteno se sintetizara a partir principalmente de licopeno, sin embargo los resultados mostraron lo contrario, por ejemplo, en la etapa inicial C1 la concentración de licopeno fue de 0.00 ppm, mientras que la concentración de  $\beta$ -caroteno fue de 0.13 ppm. Esto indicó que el  $\beta$ -caroteno también puede formarse a partir de otros compuestos intermediarios como el  $\beta$ -zeacaroteno. Por lo tanto, los resultados sugieren que la biosíntesis de  $\beta$ -caroteno es independiente de la concentración de licopeno hasta cierta etapa de maduración (Figura IV.8).

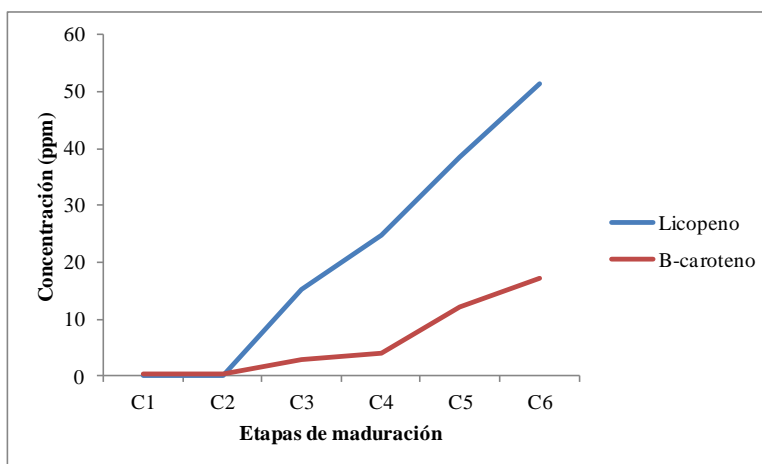
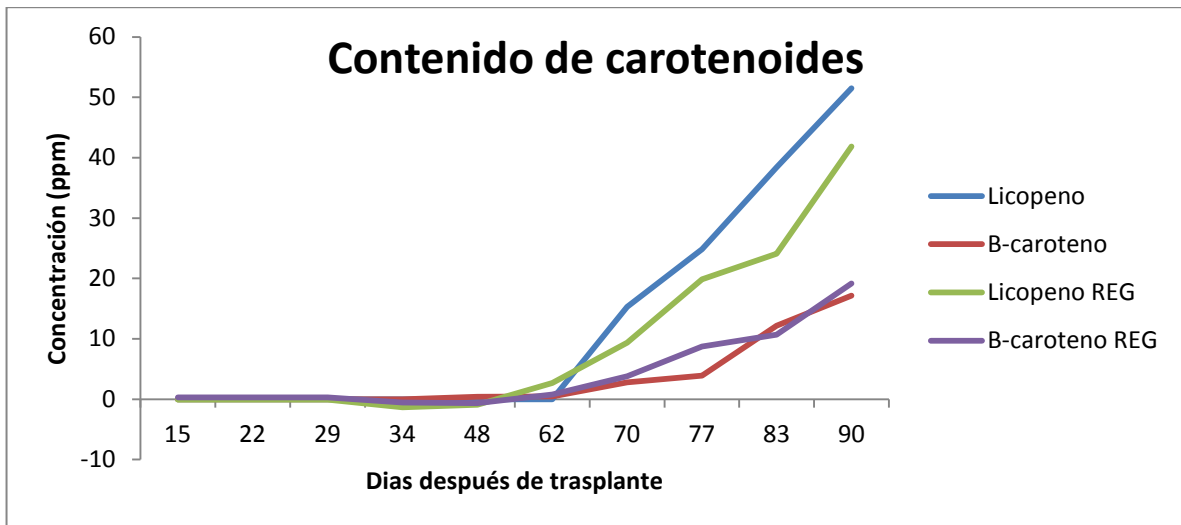


Figura IV.8 Gráfica del contenido de licopeno y  $\beta$ -caroteno en las distintas etapas de maduración

Para la estimación del contenido de licopeno y  $\beta$ -caroteno se tomaron como base las variables de estado del modelo TOMGRO reducido. Se buscaron diferentes correlaciones entre los pesos secos, número de nodos e índice de área foliar para encontrar una correlación entre estos y el contenido de carotenoides. La variable que mejor se correlacionó con los datos de licopeno y  $\beta$ -caroteno fue el peso seco de frutos maduros, lo cual era de esperarse si tomamos en cuenta que ambos carotenoides se sintetizan debido al proceso de maduración de los frutos. Para ajustar los datos de concentración de carotenoides con los de materia seca se ajustó una curva entre los puntos de datos. El mejor ajuste se logró por aproximación cuadrática con la forma:

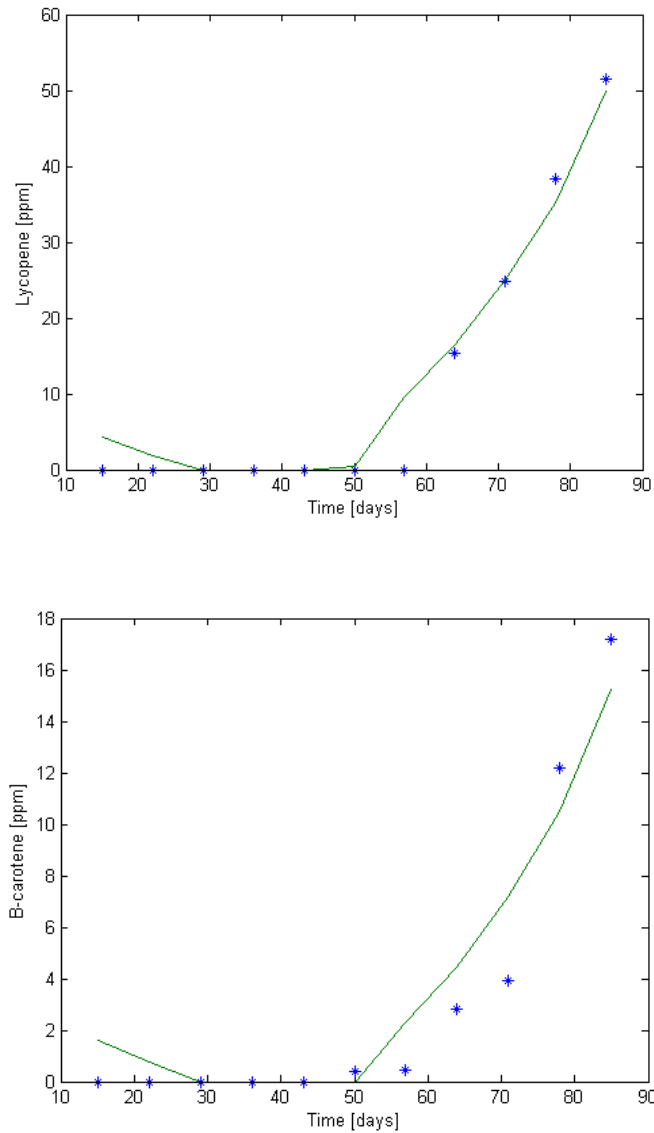
$$y = a + bx + cx^2$$

Los coeficientes de regresión para el contenido de licopeno fueron  $a=-0.0514$ ,  $b=-0.0348$  y  $c=0.0002$ . Los correspondientes para  $\beta$ -caroteno fueron  $a=0.3206$ ,  $b=-0.0212$  y  $c=0.0001$ . Estos coeficientes permitieron obtener expresiones para estimar el contenido de ambos carotenoides a partir de los datos de materia seca de frutos maduros estimados por el modelo TOMGRO reducido. En la figura IV.9 se muestra el ajuste de ambas aproximaciones respecto a los datos reales medidos durante la maduración del fruto.



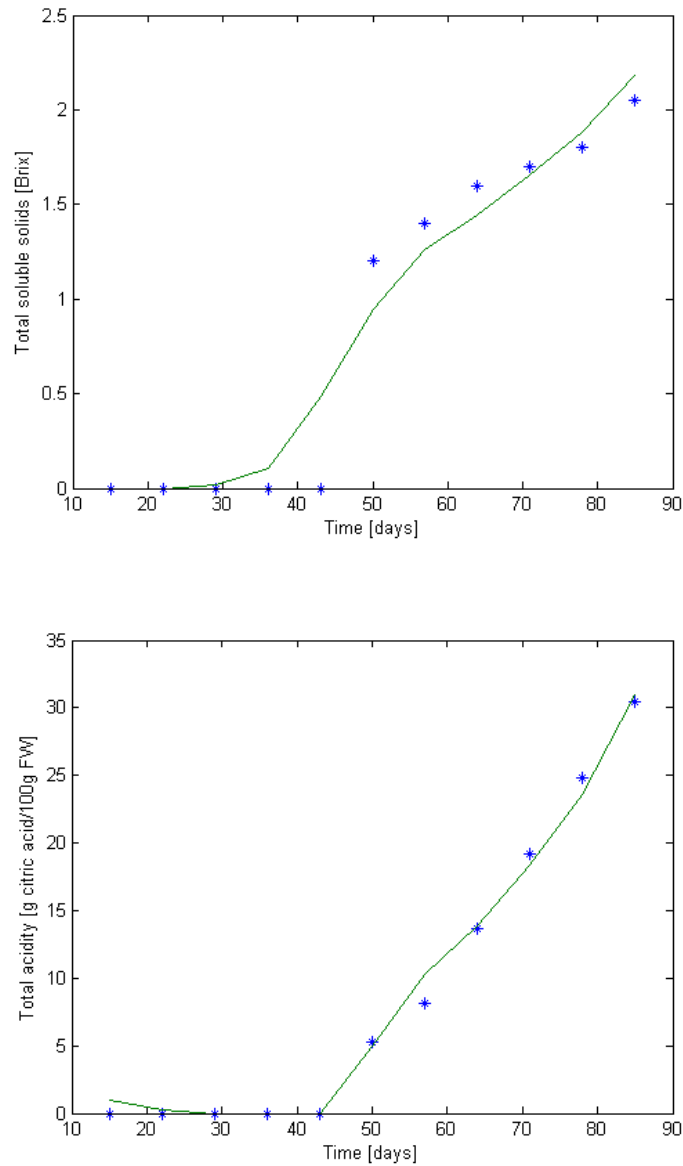
**Figura IV.9** Ajuste de las curvas de regresión para los datos de licopeno y  $\beta$ -caroteno, el término REG indica los valores obtenidos mediante regresión

El siguiente paso fue incluir ambas ecuaciones de regresión en el modelo TOMGRO reducido para comprobar la estimación del contenido de carotenoides (Figura IV.10). Se incluyeron las ecuaciones de regresión para contenido de licopeno y  $\beta$ -caroteno, así como para la estimación de sólidos solubles ( $^{\circ}$ Brix) y acidez total.



**Figura IV.10 Datos medidos (línea punteada) y simulados (línea sólida) después de la calibración para el contenido de licopeno y  $\beta$ -caroteno durante la maduración de los frutos de tomate**

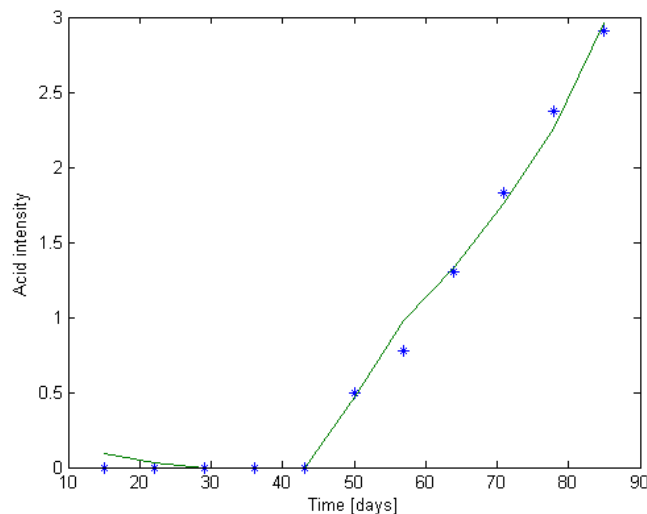
Posteriormente se estimaron las variables acidez total y contenido de sólidos solubles (°Brix) (Figura IV.11) mediante su respectivo modelo de regresión y se estimaron los coeficientes estadísticos (Tabla IV.9).

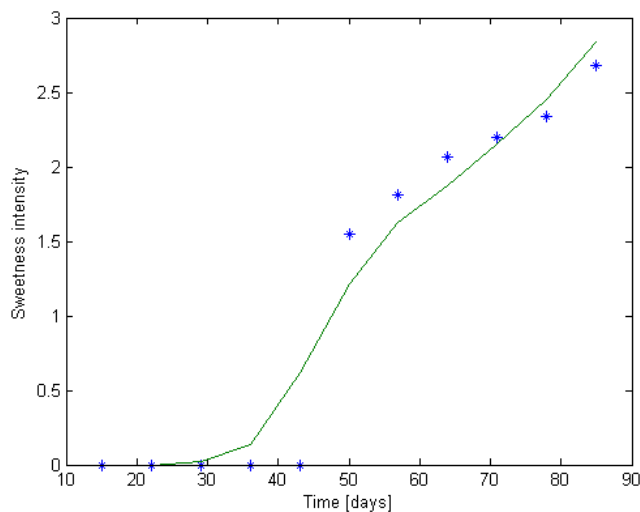


**Figura IV.11 Datos medidos (línea punteada) y simulados (línea sólida) después de la calibración para la acidez titulable (g ácido cítrico/100g FW) y el contenido de sólidos solubles (°Brix) durante la maduración de los frutos de tomate**

La temperatura, radiación y CO<sub>2</sub> influyen de manera importante en el desarrollo y calidad fisicoquímica y sensorial de los frutos de tomate. Las mejores estimaciones se lograron mediante la correlación del contenido de carotenoides con los datos de materia seca de frutos maduros. Tanto la acumulación de materia seca en el fruto como la biosíntesis de carotenoides y otros metabolitos secundarios dependen de la concentración de CO<sub>2</sub> en el ambiente (Yelle et al., 1989). Esto puede verse reflejado en el ajuste de los datos modelados con los observados, los coeficientes estadísticos arrojaron valores aceptables para el ajuste del modelo, sin embargo, se requiere más investigación con la finalidad de establecer ecuaciones lo suficientemente mecánicas para poder estimar el contenido de carotenoides en tomate a partir de datos de clima como lo hace el modelo TOMGRO.

Por otra parte, se puede observar que el ajuste del modelo no es tan aceptable para las variables sólidos solubles y acidez titulable. La correlación con los datos de materia seca de frutos maduros no arrojó tan buenos resultados como se esperaba. Las variables fisicoquímicas en la mayoría de los frutos dependen fuertemente de las condiciones climáticas y la etapa de maduración del mismo fruto. La calidad del tomate es determinada por un gran número de procesos bioquímicos que resultan en cambios en la calidad fisicoquímica y sensorial (Znidarcic, 2010). Por lo tanto, el modelo no fue capaz de estimar dichos cambios a partir de la acumulación de materia seca en el fruto, se necesitan correlaciones lo suficientemente mecánicas para explicar todos los procesos que dan lugar a los cambios en la calidad fisicoquímica del tomate.





**Figura IV.12 Datos medidos (línea punteada) y simulados (línea sólida) después de la calibración para la intensidad de los sabores dulce y ácido**

A continuación se estimaron los coeficientes  $R^2$ , %SEP, E y ARV para determinar la capacidad del modelo para estimar el contenido de carotenoides en el fruto de tomate (Tabla IV.9).

**Tabla IIV.9 Coeficientes estadísticos para el contenido de licopeno y  $\beta$ -caroteno estimados mediante modelación**

<b>Coefficiente estadístico</b>	<b>Licopeno</b>	<b><math>\beta</math>-caroteno</b>	<b>Acidez total (g ácido cítrico /100g FW)</b>	<b>Sólidos totales (<math>^{\circ}</math>Brix)</b>	<b>Intensidad Dulce</b>	<b>Intensidad Acido</b>
%SEP	28.97	46.6	9.16	20.94	20.67	9.17
E	0.96	0.92	0.99	0.95	0.95	0.99
ARV	0.037	0.078	0.006	0.049	0.048	0.006

Como se mencionó en la parte de materiales y métodos los valores %SEP y ARV deben ser cercanos a 0 y el valor E cercano a 1.0 para un ajuste adecuado. En el caso de todas las variables de calidad estos estimadores del ajuste del modelo cumplieron dichos criterios, lo que indica que las estimaciones del modelo de calidad pueden considerarse como adecuadas para las condiciones experimentales evaluadas en esta investigación. Sin embargo, la extrapolación de estos resultados a otras condiciones distintas a las de este experimento no garantiza una adecuada

estimación, en dicho caso sería conveniente partir de la recalibración de los parámetros del modelo Tomgro para mejorar el ajuste.

Los modelos matemáticos deben encaminarse hacia la estimación de variables de calidad que permitan la producción de frutos con alto valor agregado que satisfaga la demanda por parte de los consumidores, que no sólo demandan frutos con calidad externa sino también aquellos que les ofrezcan un beneficio a la salud y sabor y aroma atractivos. En esta investigación se logró establecer un modelo para estimar variables de calidad cuyos resultados fueron precisos considerando indicadores de ajuste comúnmente utilizados en este tipo de trabajos.

#### **IV.6 Conclusiones**

El diseño experimental plan Puebla permitió observar la influencia de los factores climáticos radiación, CO<sub>2</sub> y temperatura sobre el desarrollo fisiológico de las plantas y los frutos de tomate. Por otra parte, la aplicación de ácido salicílico provocó cambios importantes en las variables fisicoquímicas y sensoriales, con lo cual se demuestra el potencial que tienen estas sustancias, en particular el ácido salicílico, para mejorar la calidad de este fruto durante su desarrollo para incrementar su vida de anaquel y proporcionarle un valor agregado. La modelación matemática nuevamente demostró ser una herramienta imprescindible para la implementación de sistemas de control en invernadero que proporcionen las condiciones adecuadas para mejorar la calidad de los productos hortícolas. Los análisis de sensibilidad aquí realizados en el modelo Tomgro reducido permitieron evaluar la influencia de las condiciones climáticas en los valores de los parámetros del modelo. Lo anterior también permitió analizar la incertidumbre que se genera en las salidas del modelo debido a la variación de las variables de estado en cada uno de los tratamientos planteados por el diseño experimental Plan Puebla. Una vez calibrado el modelo permitió estimar el crecimiento y producción de los tomates en diferentes condiciones. Puesto que el objetivo de este proyecto no solo fue calibrar el modelo Tomgro sino adecuarlo para estimar cantidad de licopeno y  $\beta$ -caroteno, así como estimar los sólidos solubles totales (°Brix) y la acidez total, variables importantes en el proceso de maduración del fruto de tomate y que sin duda definen el carácter funcional de este fruto. La

correlación de la variable peso seco de frutos maduros ( $W_M$ ) con las variables climáticas permitió establecer un modelo complementario al Tomgro para estimar variables de calidad fisicoquímica, sensorial y funcional. Estas características formarán parte esencial en los modelos matemáticos que se desarrollen en el futuro obedeciendo a la demanda de los consumidores por productos funcionales con un alto valor agregado. La obtención de dichos productos, en este caso de hortalizas como el tomate, la agricultura de precisión será indispensable pues los sistemas de control que en ella se emplean se basarán en modelos matemáticos que permitan hacer estimaciones precisas y establecer las condiciones más adecuadas para la obtención de hortalizas de calidad nutricional, sensorial y funcional.



---

**BIBLIOGRAFÍA**

- Achilea, O. (1999) Citrus and tomato quality is improved by optimized K nutrition. *Developments in Plant and Soil Sciences*, 86:19-22
- Acree, T.E. (1994). Gas chromatography-olfactometry. Flavor measurement, Ed. Marcel Dekler, EUA, pp.77-95
- Acree, T.E., Barnard, J., Cunningham, D.G. (1984). A procedure for the sensory analysis of gas chromatographic effluents. *Food Chem*, 14:273-286
- Acutis, M., Confaonieri, R., 2006. Optimization algorithms for calibrating cropping systems simulation models. A case study with simplex-derived methods integrated in the WARM simulation environment. *Italian Journal of Agrometeorology*, 3, 26-34.
- Adams, S.R., Cockshul, K.E., Cave, C.R.J. (2001). Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. *Annals of Botany* 88:869-877
- Adegoroye, A.S., Jolliffe, P., 2006. Some inhibitory effects of radiation stress on tomato fruit ripening. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 39, 297-302.
- Alcazar-Esquinas, J.T. (1981). Genetics resources of tomatoes and wild relatives. International Board for Plant Genetic Resources, Rome.
- Archer, G.E.B., Saltelli, A., Sobol, I.M., 1997. Sensitivity measures, ANOVA-like techniques and the use of bootstrap. *J. Statist. Comput. Simul.*, 58, 99-120.
- Arias, R., Lee, T.C., Logendra, L., Janes, H. (2000). Correlation of lycopene measured by HPLC with the L\*, a\*, b\* color readings of a hydroponic tomato and the relationship of maturity with color and lycopene content. *J. Agric. Food Chem.*, 48, 1697-1702.
- Arthur, C.L., y Pawlizsyn, J. (1990) "Solid phase microextraction with thermal desorption using fused silica optical fibers", *Anal. Chem.*, 62, pp. 2145-2148.

Babalar, M., Asghari, M.R., Talaei, A., Khosroshahi, A., 2007. Effect of pre- and post-harvest salicylic acid treatment on ethylene production, fungal decay, and overall quality of “Selva” strawberry fruit. *Food Chem*, 105, 449-453.

Bacci, L., Battista, P., Rapi, B., 2012. Evaluation and adaptation of TOMGRO model to Italian tomato protected crops. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*. 40, 115-126.

Bakker, J. C. (1984). “Physiological disorders in cucumber under high humidity conditions and low ventilation rates in greenhouses”. *Acta Hort*. 156: 257–264.

Bakker, J.C., Bot, G.P.A. Challa, H., Van de Braak, N.J. 1995. Greenhouse climate control: An integrated approach. Wageningen, The Netherlands: Wageingen Pers.

Barneix, A.J. (1990) “Yield variation in wheat: nitrogen accumulation, light interception and harvest index”. In *Causes and Consequences of Variation in Growth Rate and Productivity of Higher Plants*, eds.H. Lambers, M. L. Cambridge, H. Konings, T. L. Pons, 87–100. Academic Publishing, The Hague.

Batu, A. (2003) “Effect of a long-term controlled atmosphere storage on the sensory quality of tomatoes”, *Ital. J. Food Sci.* 4, 15.

Batu, A. (2004). Determination of acceptable firmness and color values of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 61, 471-475.

Beltran, J., Serrano, E., López, F.J. y Peruga, A. (2006) “Comparison of two quantitative GC-MS methods for analysis of tomato aroma based on purge-and-trap and on solid phase microextraction”, *Anal. Bioanal. Chem.* (2006) 385: 1255–1264

Besford, R.T., Ludwig, L.J., Withers, A.C., 1990. The greenhouse effect: Acclimation of tomato plants growing in high CO<sub>2</sub>, photosynthesis, and ribulose-1,5-biphosphate carboxylase protein. *J. Exp. Bot.*, 41, 925-931.

Bot, G.P.A. (2003) "The solar greenhouse: technology for low energy consumption". *Acta Hort.* 611:61-69

Bouman, B.A.M., van Keulen, H., van Laar H.H., Rabbinge R. (1996). The „School of de Wit“ Crop Growth Simulation Models: A Pedigree and Historical Overview. *Agricultural Systems.* Vol. 52. Nos.2/3. pp. 171-198.

Bruckner, B., Krumbein, A., Schwarz, D., and Klaring, P. (2004) "Temperature Effects on Tomato Quality". IX International Symposium on Soilless Culture and Hydroponics, Almeria, Spain, 14–19 November, 2004. Book of summary, 173.

Bruhn C.M., Feldman N., Garlitz C., Harwood, J., Ivans E., Marshall M., Riley A., Thurber D. y Williamson E. (1991) "Consumer perceptions of quality: Apricots, cantaloupes, peaches, pears, strawberries, and tomatoes". *J. Food Qual.* 14: 187.

Bruulsema, T.W., Paliyath, G., Schoefield, A., Oke, M. (2004). Phosphorus and phytochemicals. *Better Crops*, 88:6

Bull, M.K., Zerdin, K., Howe, E., Goicoechea, D., Paramanandhan, P., Stockman, R., Sellahewa, J., Szabo, E.A., Johnson, R.L., Steward, C.M. (2004). The effect of high pressure processing on the microbial, physical, and chemical properties of Valencia and Navel orange juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5:135-149

Bunghez, I.R., Raduly, M., Doncea, S., Aksahin, I., Ion, R.M. (2011). Lycopene determination in tomatoes by different spectral techniques (UV-VIS, FTIR, and HPLC). *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 6, 1349-1356.

Carli, P., Arima, S., Fogliano, V., Tardella, L., Frusciante, L., Ercolano, M.R. (2009). Use of network analysis to capture key traits affecting tomato organoleptic quality. *Journal of Experimental Botany*, 60(12):3379-3386

Castilla, N. y Hernández, J. (2005). "The plastic greenhouse industry in Spain". *Chron. Hortic.* 45(3):15–20

- Castilla, N., Hernández, J., y Abou-Hadid, A.F. (2004) “Strategic crop and greenhouse management in mild winter climate areas”. *Acta Hort.* 633:183-196.
- Causse, M., Buret, M., Robini, K., Verschave, P. (2003). Inheritance of nutritional and sensory quality traits in fresh market tomato and relation to consumer preferences. *Journal of Food Science*, 68:2342-2350
- Chapagain, B.P., Wiesman, Z., Zaccai, M., Imas, P. y Magen, H. (2003) “Potassium Chloride Enhances Fruit Appearance and Improves Quality of Fertigated Greenhouse Tomato as Compared to Potassium Nitrate”, *Journal of plant nutrition*, Vol. 26, No. 3, pp. 643–658,
- Chapagain, B.P., Wiesman, Z., Zaccai, M., Imas, P., Magen, H. (2003). Potassium chloride enhances fruit appearance and improves quality of fertigated greenhouse tomato as compared to potassium nitrate. *Journal of Applied Nutrition*, 26(3):643-658
- Confalonieri, R., Bellochi, G., Tarantola, S., Acutis, M., Donatelli, M., Genovese, G., 2011. Sensitivity analysis of the rice model WARM in Europe: Exploring the effects of different locations, climates and methods of analysis on model sensitivity to crop parameters. *Environmental Modelling & Software*, 25, 479-488.
- Cooman A., Schrevens, E., 2007. Sensitivity of the TOMGRO model to solar radiation intensity, air temperature and carbon dioxide concentration. *Biosystems Engineering*, 96, 249-255.
- Cooman, A., Schrevens E., 2006. A Monte Carlo approach for estimating the uncertainty of predictions with the tomato plant growth model TOMGRO. *Biosystems Engineering*, 94, 517-524.
- Cournede, P.H., Letort, V., Mathieu, A., Kang, M.Z., Lemaire, S., Trevezas, S., Houlier, F., Reffye, P. 2011. Some parameter estimation issues in functional structural plant modeling. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*, 6, 133-159.
- Cuartero, J., Fernández-Muñoz, R. (1999). Tomato and salinity, *Sci. Hortic.* 78:83-125
- D’Souza, M.C., Singha, S., Ingle, M. (1992). Lycopene concentration of tomato fruit can be estimated from chromaticity values. *HortScience*, 27, 465-466.

- Darawsheh, M.K., Bouranis, D.L. (2006). Season-dependent fruit loading: Effect on dry mass, water, and nitrogen allocation in tomato plants. *Journal of Plant Nutrition*, 29:347-359.
- Davies, J., Hobson, G.E., 1981. The constituents of tomato fruit. The influence of environment, nutrition, and genotype. *CRC Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 15, 205-280.
- Dayan, E., van Keulen, H., Jones, J.W., Zipori, I., Shmuel, D., Challa, H., 1993. Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model: II. Field calibration and validation. *Agricultural Systems*, 43, 165-183.
- DeJonge, K.C., Ascough II, J.C., Ahmadi, M., Andales, A.A., Arabi, M., 2012. Global sensitivity analysis of a dynamic agroecosystem model under different irrigation treatments. *Ecological Modeling*, 231, 113-125.
- Di Cesare, L. F., Migliori, C., Viscardi, D., Parisi, M. (2010). Quality of tomato fertilized with nitrogen and phosphorus. *Ital. J. Food Sci.* 22:186-191
- Di Cesare, L.F., Forni, E., Viscardi, D., Ferrari, V. 2003. Valutazione della composizione aromatica e chimico-fisica di alcune cultivar di pomodoro da impiegare per il consumo diretto o per la trasformazione. *Ind. Conserve* 78:195
- Dias, M.G., Camoes, M.F., Oliveira, L. (2008). Uncertainty estimation and in-house method validation of HPLC analysis of carotenoids for food composition data production. *Food Chem*, 109:815-824.
- Dinnes, D. L., D. L. Karlen, D. B. Jaynes, T. C. Kaspar, J. L. Hatfield, T. S. Colvin, and Cambardella, C. A. (2002) "Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils". *Agronomy Journal* 94: 153–171.
- Dorais, M., Ehret, D.L., Papadopoulos, A.P. (2008) Tomato (*Solanum lycopersicon*) health components: from the seed to the consumer. *Phytochem. Rev.* 7:231.
- Dravnieks, A., O'Donnell, A. (1971). Principles of some techniques of high resolution headspace analysis. *J. Agric. Food Chem.* 19:1049-1056

Dris, R., Jain, S.M. (2004). Production practices and quality assessment of food crops. Quality handling and evaluation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-London.

Ece, A., Darakci, N. (2009). Effect of number of different stems on some fruit quality characteristics and yield in tomatoes (*Lycopersicon lycopersicum* L.). Journal of applied Biological Sciences 3(2):160-163.

Eiben, A.E., Smith, J.E., 2003. Introduction to evolutionary computing. Springer, Berlin

Enoch HZ, Enoch Y (1999) "The history and geography of the greenhouse". Greenhouse ecosystems. In: Stanhil G, Enoch HZ (eds) Ecosystems of the world 20. Elsevier, Amsterdam, pp1-15

Evans, W.B. y McMahon, M. (2004) "Use of far-red light filtering film during transplant production reduces tomato seedling height and may influence subsequent fruit yield". *Acta Hort.* 631: 125-128.

Fageria, N.K. y Santos, A.B. (2005) "Irrigated rice response to green manuring and chemical fertilizers in the Satate of Tocantins". Paper presents at the XXX Brazilian Soil Sciences Congress, 17 to 22 July 2005, Recife, Brazil: Brazilian Soil Science Society.

Fieberg, J., Jenkins, K.J., 2005. Assessing uncertainty in ecological systems using global sensitivity analyses: a case example of simulated wolf reintroduction effects on elk. *Ecological Modelling*, 187, 259-280.

Fischer, C., Scott, T.R. (1997). Food flavours, biology and chemistry. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, pp.165

Fitter, A.H. y Hay, R.K.M. (2001) "Environmental physiology of plants" Academic Press London

Fleisher, D.H., Logendra, L.S., Moraru, C., Both, A.J., Cavazzoni, J., Gianfagna, T., Lee, T.Ch., Janes, H.W., 2006. Effect of temperature perturbations on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) quality and production scheduling. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 81, 125-131.

- Fraschina, A., Vartorelli, F., Moccia, S., Monaco, E. and Chiesa, A. 1998. effect of maturity stage and temperature during tomato (*lycopersicon esculentum* mill.) storage. Acta Hort, 464, 486-486.
- Fraser, P.D., Enfissi, M.A., Goodfellow, M., Eguchi, T., Bramley, P.M. (2007). Metabolite profiling of plant carotenoids using the matrix-assisted laser desorption ionization time-of-flight mass spectrometry. The Plant Journal, 49, 552-564.
- Fraser, P.D., Truesdale, M.R., Bird, C.R., Schuch, W., Bramley, P.M. (1994). Carotenoid biosynthesis during tomato fruit development. Plant Physiol, 105, 405-413.
- García, E., Barrett, D.M. (2006). Evaluation of processing tomatoes from two consecutive growing seasons: quality attributes, peelability, and yield. Journal of Food Processing and Preservation 30:20-36
- Giovannucci, E. (2005). Tomato products, lycopene, and prostate cancer: A review of the epidemiological literature. J. Nutr, 135, 2030-2031.
- Girish, N. y Umesha, S. (2005) "Effect of plant growth promoting rhizobacteria on bacterial canker of tomato", Archives of Phytopathology and Plant Protection 38(3): 235 – 243
- Goudriaan, J., van Laar, H.H. (1994). Modeling potential crop growth processes. Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Greve, L.C., McArdle, R.N., Gohlke, J.R., Labavitch, J.M., 1994. Impact of heating on carrot firmness. Changes in cell wall components. J. Agric. Food Chem.,42, 2900-2906.
- Grimstad, S.O. (1987) "Supplementary lighting of early tomatoes after planting out in glass and acrylic greenhouses". *Sci. Hortic.* **33**(3-4): 189-196.
- Grosch, W. (2001). Evaluation of the key odorants in foods by aroma extract dilution experiments, aroma models, and omission. Chem. Senses, 26:533-545
- Gunay, A. (1981). Advance vegetable growing II. Cag Matbaasi, 323, Ankara, Turquía
- Guzmán, M., Sánchez, A. (2000). Sistemas de explotación y tecnología de producción. En: J.Z. Castellanos y M. Guzmán Palomino (Eds). Ingeniería, manejo y operación de invernaderos para

la producción intensiva de hortalizas: Instituto de capacitación para la productividad agrícola, S.C.

Guzman-Cruz, R., Castañeda-Miranda, R., Garcia-Escalante, J.J., Lopez-Cruz, I.L., Lara-Herrera, A., de la Rosa, J.I. (2009). Calibration of greenhouse climate model using evolutionary algorithms. *Biosystems Engineering*, 104, 135-142.

Haan, C.T., 2002. *Statistical methods in hydrology*. 2<sup>nd</sup> Ed., Ames, Iowa: Iowa State University Press.

Hanan, J.J. (1998) "Greenhouse: Advance technology for protected horticulture" CRC Press, Boca Raton, Boston, New York, pp. 684

Harker, F.R., Elgar, H.J., Watkins, C.B., Jackson, P.J., Hallett, I.C., 2000. Physical and mechanical changes in strawberry fruit after high carbon dioxide treatments. *Postharvest Biology and Technology*, 19, 139-146.

Hartman, P.L., Mills, H.A., Jones, J.B. (1986). The influence of nitrate: ammonium ratios on growth, fruit development, and element concentrations in "Floradel" tomato plants. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 111:487-490

Hartz, T.K., Miyao, E.M., Mullen, R.J., Cahn, M.D. (2001) Potassium fertilization effects on processing tomato yield and fruit quality. *Acta Hort.* 542:127-133.

Heiser, C.J. (1969). Lave apples. *In*nightshades: The Paradoxical Plants. Freeman San Francisco CA, pp.53-55

Hernández, M.I., Chailloux, M., Moreno, V., Mojena, M., Salgado, J.M. (2009). Relaciones nitrógeno potasio en fertirriego para el cultivo protegido del tomate (*Solanum lycopersicon* L.) y su efecto en la acumulación de biomasa y extracción de nutrientes. *Cultivos Tropicales*, 30:71-78.

Herrero, J.M., Blasco, X., Martinez, M., Ramos, C., Sanchis, J., 2007. Robust identification of non-linear greenhouse model using evolutionary algorithms. *Control Engineering Practice*, 16, 515-530.



Herrman, K. (2001). *Inhaltstoffe von obst und Gemuse*. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co, Stuttgart, pp. 200

Huaiying, Y., Xiaodan, J. y Fengzhi, W. (2006) "Effects of continuous cucumber cropping and alternative rotations under protected cultivation on soil microbial community diversity", *Plant and soil*, 284:195-203

INFOAGRO. (2004). *El cultivo del tomate*.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (2001) *Anuario Estadístico del Estado de Yucatán*. INEGI. Gobierno del Estado de Yucatán, México.

Ishida, B.K., Ma, J., Chan, B. (2001). A simple, rapid method for HPLC analysis of lycopene isomers. *Phytochem. Anal.*, 12:194-198.

Jones, J. B. (1997). *Hydroponics: A practical guide for the soilless grower*. Boca Raton, FL: St. Lucie Press.

Jones, J.W., Dayan, E., Allen, L.H., van Keulen, H., Challa, H., 1991. A dynamic tomato growth and yield model. *Transactions of the ASAE*, 34, 73-84.

Jones, J.W., Kenig, A., Vallejos, C.E., 1999. Reduced state-variable tomato growth model. *Transactions of the ASAE*, 42, 255-265.

Kachiik, F., Carvalho, L., Bernstein, P.S., Muir, G.J., Zhao, D.Y., Katz, N.B. (2002). Chemistry, distribution, and metabolism of tomato carotenoids and their impact on human health. *Experimental Biology and Medicine*, 227:845-851.

Kader, A.A., Stevens, M.A., Albright-Holton, M.A. (1978). Composition and flavor quality of fresh market tomatoes as influenced by some post-harvest handling procedures. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 103:6-13.

Kays, S.J. (1999). Preharvest factors affecting appearance. *Postharvest Biology and Technology*, 15:233-247

Kenig, A., Jones, J.W., 1997. TOMGRO V3.0: A dynamic model of tomato growth and yield, Ch. II-5. In *Optimal Environmental Control for Indeterminate Greenhouse Crops*, eds. I. Seginer,

J.W. Jones, P. Gutman, and C.E. Vallejos. BARD Research Report No. IS-1995-91RC. Haifa, Israel: Agricultural Engineering Dept. Technion.

Lambers, H., Freijssen, N., Poorter, H., Hirose, T. y van der Werf, A. (1990) "Analyses of growth based on net assimilation rate and nitrogen productivity. Their physiological background". In: Causes and consequences of variation in growth rate and productivity of higher plants. eds. H. Lambers, M. L. Cambridge, H. Konings and T. L. Pons, 1–18. The Hague: SPB Academic Publishing.

Lampers, H., Chapin, F.S., Ponms, T.L. (1998). Plant physiological ecology, 5, 59, 117, 251, New-York, Springer-Verlag.

Landy, P., Courthadoun, J.L., Dubois, C., Voilley, A. (1996). Effect of interface in model food emulsions on the volatility of aroma compounds. J. Agric. Food Chem, 44:526-530.

Larney, F., y Janzen, H.H. (1996) "Restoration of productivity to a desurfaced soil with livestock manure, crop residue, and fertilizer amendments". Agronomy Journal 88:921-927

Lin, C.H., Chen, B.H. (2003). Determination of carotenoids in tomato juice by liquid chromatography. Journal of Chromatography, 1012:103-109.

Linker, R., Seginer, I., Buwalda, F., 2004. Description and calibration of a dynamic model for lettuce grown in a nitrate-limiting environment. Mathematical and Computer Modelling, 40, 1009-1024.

Lisanti, M.T., Piombino, P., Genovese, A., Pessina, R. y Moio, L. (2008) "Traditional italian tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars and their commercial homologues: differences in volatile composition", Ital. J. Food Sci. n.3, 20: 333-348

López-Cruz, I.L., Ramírez-Arias, A., Rojano-Aguilar, A. (2005). Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: Trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. Revista Chapingo Serie Horticultura 11(2):257-267

Lopez-Cruz, I.L., Ramirez-Arias, A., Rojano-Aguilar, A., 2004. Analisis de sensibilidad de un modelo dinámico de crecimiento para lechugas (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en invernadero. Agrociencia, 38, 613-624.

- Lucini, L., Pellizzoni, M., Baffi, C., Molinari, G.P. (2011). Rapid determination of lycopene and  $\beta$ -carotene in tomato by liquid chromatography/electrospray tandem mass spectrometry. *J. Sci Food Agric*, 92:1297-1303.
- Lurie, S., Handros, A., Fallik, E., Shapira, R., 1996. Reversible inhibition of tomato fruit gene expression at high temperature. *Plant Physiol.*, 110, 1207-1214.
- MacRae, R.J. y Meyhus, G.R. (1985) "The effect of green manuring on the physical properties of temperate area soils". *Advances in Soil Sciences* 3:71-94
- Marcelis, L. F. M. (1993) "Fruit growth and biomass allocation to the fruits in cucumber: Effect of fruit load and temperature". *Sci. Hort.* **54**: 107–121.
- Marschner, H. 1995 Mineral nutrition for higher plants, 2<sup>nd</sup> ed. San Diego, Calif.: Academic Press.
- Marsili, R. (2006). Sensory-directed flavor analysis. *Technology and Industrial Arts*, pp. 2-23
- Mattheis, J. P., and Fellman, J. K. (1999) "Preharvest factors influencing flavor of fresh fruit and vegetables". *Postharvest biology and technology* **15**: 227–232.
- Miettinen, S.M. (2004). Instrumentally measured release and human perception of aroma compounds from foods and model system differing in fat content. Academic Dissertation, University of Helsinki, pp.11-77
- Mikkelsen, R.L. 2005. Tomato flavor and plant nutrition: A brief review. *Better Crops*, 89:14-15
- Monod, H., Naud, C., Makowski, D., 2006. Uncertainty and sensitivity analysis for crop models. In Wallach, D., Makowski, D., Jones, J.W. (eds). 2006. Working with dynamic crop models. Evaluation, analysis, parameterization, and applications. Elsevier. Amsterdam. The Netherlands. 447 pp.
- Montaña-Camara, M., Torrecilla, J.S., Caceres, J.O., Cortez-Sanchez, M., Fernandez-Ruiz, V. (2010). Neural Network Analysis of spectroscopic data of lycopene and  $\beta$ -carotene content in food samples compared to HPLC-UV-Vis. *J. Agric. Food Chem*, 58, 72-75

- Nederhoff, E.M., Vegter J.G. (1994) "Canopy Photosynthesis of Tomato, Cucumber and Sweet Pepper in Greenhouses: Measurements Compared to Models". *Annals of Botany* No. 73 pp. 421-47.
- Neudes, M. (2003) Variación diurna y temporal del pH y la composición mineral de la savia del xilema en tomate. *Horticultura Brasileira*, 21:10-14
- Nossent, J., Elsen, P., Bauwens, W., 2011. Sobol' sensitivity analysis of a complex environmental model. *Environmental Modelling & Software*, 26, 1515-1525.
- Núñez-Muñoz, J.L. (2000) "Aplicación de los modelos matemáticos de flujo y transporte de contaminantes para el diseño de sistemas de remediación".
- Oke, M., Ahn, T., Schofield, A., Paliyath, G. (2005) Effects of phosphorus fertilizer supplementation on processing quality and functional food ingredients in tomato. *J. Agric. Food Chem.* 56:1531.
- Olives-Barba, A.I., Camara-Hurtado, M., Sanchez-Mata, M.C., Fernandez-Ruiz, V., Lopez-Saenz de Tejada, M. (2006). Application of a UV-vis detection-HPLC method for a rapid determination of lycopene and  $\beta$ -carotene in vegetables. *Food Chem*, 95, 328-336.
- Overman, A.R. (1984) "Estimating crop growth rate with land treatment", *J. Environ. Eng. Div.* 110:1009-1012
- Overman, A.R. (1984) "Estimating crop growth rate with land treatment", *J. Environ. Eng. Div.* 110:1009-1012
- Overman, A.R.; Martin, F.G.; Wilkinson, S.R. (1990) "A Logistic Equation for Yield Response of Forage Grass to Nitrogen". *Commun. Soil Sci. Plant Anal*, 21, 595-609.
- Overman, A.R.; Martin, F.G.; Wilkinson, S.R. (1990) "A Logistic Equation for Yield Response of Forage Grass to Nitrogen". *Commun. Soil Sci. Plant Anal*, 21, 595-609.
- Ozbun, J.L., Boutonnet, C.E., Sadik, S., Minges, P.E. (1974) Tomato fruit ripening. I. Effect of potassium nutrition on occurrence of white tissue. *Amer. Soc. Hort. Sci.* 91:31-38
- Pardossi, A., Tognoni, F. e Incrocci, L. (2004) "Mediterranean greenhouse technology". *Chron. Horticult.* 44(2):28-34

- Parisi, M., Giordano, I., Pentangelo, A., D'onofrio, B., Villari, G. (2006). Effects of different levels of nitrogen fertilization on yield and fruit quality in processing tomato. IN proceedings of ISHS Symposium "Toward ecologically sound fertilization strategies for field vegetable production", Perugia, June,7-10, Acta Hort., 700-129
- Peet, M. M. 1999. Greenhouse crop stress management. *Acta Hort.* 481: 643–654.
- Pérez Parra, J., Baeza, E., Montero, J.I. y Bailey, B. (2004) "Natural ventilation of parral greenhouses". *Biosyst. Eng.* 87:355–366
- Periago, M.J., Garcia-Alonso, J., Jacob, K., Olivares, A.B., Bernal, M.J., Iniesta, M.D., Martinez, C., Ros, G. (2009). Bioactive compounds, folates and antioxidant properties of tomatoes (*Solanum esculentum*) during vine ripening. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60, 694-708.
- Petersen, K.K., Willumsen, J., Kaack, K. (1998). Composition and taste of tomatoes as affected by increased salinity and different salinity sources. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 73:205-215
- Pila, N., Gol, N.B., Ramana-Rao, T.V., 2010. Effect of postharvest treatments on physicochemical characteristics and shelf life of tomato (*Lycopersicon esculentum*) fruits during storage. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.* 9, 470-479.
- Poorter, H. y Van der Werf, A. (1998) "Is inherent variation in RGR determined by LAR at low irradiance and by NAR at high radiance? A review of herbaceous species". In *Inherent Variation in Plant Growth. Physiological Mechanisms and Ecological Consequences*, eds. H. Lambers, H. Poorter and M. M. I. Van Vuuren, 309–336. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Radzevicius, A., Viskelis, P., Bobinas, C., 2008. Quality and physiological parameters of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruits of Lithuanian selection. *Biologija*, 54, 108-111
- Rao, A.V. Agarwal, S. (2000). Role of antioxidant lycopene in cancer and heart disease. *J. Am. Coll. Nutr.* 19:563

Ratanachinakorn, B., Klieber, A., Simons, D.H. (1997). Effect of short-term controlled atmospheres and maturity on ripening and eating quality of tomatoes. *Postharvest Biology and Technology*, 11:149-154

Riga, P., Anza, M., Garbizu, C. (2008). Tomato quality is more dependent on temperature than on photosynthetically active radiation. *J Sci Food Agric* 88:158-166

Rijkens, F., Boelens, M.H. (1975). The future of the aroma research. *Aroma Research. Proceedings of the International Symposium on Aroma Research. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen*, pp. 203-220

Ríos, Sixto (1995). *Modelización*. Alianza Universidad. ISBN 978-84-206-2822-6.

Rothe, M., Thomas, B. (1963). Aroma of bread, evaluation of chemical taste analyses with the aid of threshold value. *Z. Lebensm. Unters. Forsch, Germany*, 119, pp. 302-310

Russell, G., Jarvis, P.G., Monteith, J.L. (1989). Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: Russell, G. (Ed.), *Plant Canopy: Their growth, Form and Function*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 21-39

Sablani, S.S. (2006). Drying of fruits and vegetables: Retention of nutritional/functional quality. *Drying Technology*, 24:123-135.

SAGARPA (2008). Servicio de información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera SIAP, SIACON.

Sainju, U.M., Dris, R., Singh, B. (2003). Mineral nutrition of tomato. *Food, Agriculture and Environment*, 1(2):176

Saito, S., Kano, F.J. (1970) Influence of nutrients on growth of solanaceous vegetable plants, quality and chemical composition in their fruits (part I). On the effect of different phosphate levels on the lycopene content of tomatoes. *J. Agric. Sci. Tokyo*, 14:233

Saltelli, A., Chang, K., Scott, M., 2000. *Sensitivity analysis*. J. Wiley & Sons, England.

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., Tarantola, S., 2008. Global sensitivity analysis. The Primer. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, England, 292 pp.

Serrano-Megias, M., Lopez-Nicolas, J.M. (2006). Application of agglomerative hierarchical clustering to identify consumer tomato preferences: influence of physicochemical and sensory characteristics on consumer response. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86:493-499

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2010). Resumen nacional de la producción agrícola.

Seymour, G.B., Manning, K., Eriksson, E.M., Popovich, A.H., King, G.J. (2002). Genetic identification and genomic organization of factors affecting fruit texture. *Journal of Experimental Botany*. 53:2065-2071

Silvestri, G., Siviero, P. 1991. La coltivazione del pomodoro da industria. Edizioni l'informatore Agrario:39

Sima, R.M., Maniutiu, D.N., Cenariu, D., Lazar, V., Sima, N.F. (2010). The impact of cultura system and fertilization type on yield and fruit quality of greenhouse tomatoes. *AAB Bioflux*, 2:49-55

Singh, B., Kumar, M., Hasan, M. (2005). Performance of tomato cultivars under greenhouse conditions in Northern India. *Journal of Vegetable Science*, 11(4):73-81

Sobol', I., 1993. Sensitivity estimates for non-linear mathematical models. *Math. Model Comput. Exp.*, 1, 407-417.

Sobol', I.M., 1990. On sensitivity estimation for non-linear mathematical models. *Matematicheskoe Modelirovanie*, 112-118.

Srivastava, M.K., Dwivedi, U.N., 2000. Delayed ripening of banana fruit by salicylic acid. *Plant Science*, 8, 87-96.

Steta, G.M. (2003). Panorama de la horticultura en México. Memorias. 4° Congreso Internacional. Producción de Hortalizas en Invernadero.

Szczesniak, A.S. (2002). Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference*, 13:215-225.

Tang, Y., Reed, P., Wagener, T., van Werhoven, K., 2007. Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 793-817.

Tapia, M.L., Gutiérrez, v. (1997). Distribution pattern of dry weight, nitrogen, phosphorus, and potassium through tomato ontogenesis. *Journal of Plant Nutrition*, 20:783-791

Terry, L.A., Joyce, D.C., 2004. Elicitors of induced disease resistance in postharvest horticulture crops: A brief review. *Postharvest Biol. Tec.*, 32, 1-13.

Thornley, J.H.M., Johnson, I.R. (2000). Plant and crop modeling. A mathematical approach to plant and crop physiology. The Blackburn Press. New Jersey, USA

Torrado, A. (2002). Inocuidad en la producción agrícola. Memorias seminario “Protección fitosanitaria base fundamental en la competitividad agrícola”, Instituto Colombiano Agropecuario, Seccional Santander, Bucaramanga, Julio.

Turrent, F.A., Laird, R.J. (1985). La matriz experimental plan Puebla para ensayos sobre prácticas de producción de cultivos. Volumen 1: Escritos sobre la metodología de la investigación en productividad de agrosistemas. Ed. 3, ISBN 9688390127, 9789688390122. 28 pages.

Van Henten, E.J., 2003. Sensitivity analysis of an optimal control problem in a greenhouse climate management. *Biosystems Engineering*, 85, 355-364.

Van Straten, G., Lopez-Cruz, I., Seginer, I., Buwalda, F., 1999. Calibration and sensitivity analysis of a dynamic model for control of nitrate in lettuce. *Acta Horticulturae*, 507, 149-156.

Van Straten, G., Van Willigenburg, G., Van Henten, E., Van Ooteghem, R., 2011. Optimal control of greenhouse cultivation. CRC Press, Boca Raton, FL.



- Vazquez-Cruz, M.A., Torres-Pacheco, I., Miranda-Lopez, R., Cornejo-Perez, O., Osornio-Rios, R., Romero-Troncoso, R., Guevara-Gonzalez, R.G. (2010). Potential of mathematical modeling in fruit quality. *African Journal of Biotechnology*, 9, 260-267.
- Venkata-Rao, S., Ravi-Kiran, V.S. (2011). Effect of lycopene in tomato as a natural antioxidant in osteoarthritis. A pilot study. *International Journal of Academic Research*, 3, 1076-1079.
- Waldron, K.W., Smith, A.C., Parr, A.J., Ng, A., Parker, M.L., 1997. New approaches to understanding and controlling cell separation in relation to fruit and vegetable texture. *Trends in Food Science and Technology*, 8, 213-221.
- Warren, W.J., Hand, D.W. y Hannah, M.A. (1992) "Light interception and photosynthetic efficiency in some glasshouse crops". *J. Exp. Bot.* 43:363-373
- Watson, R., Wright, C.J., McBurney, T., Taylor, A.J., Linforth, R.S.T., 2002. Influence of harvest date and light integral on the development of strawberry flavor compounds. *Journal of Experimental Botany*. 53, 2121-2129.
- Willey, R.W. (1990). Resource use in intercropping systems. *Agricultural Water Management*, 17:215-231.
- Wold, A. B., Rosenfeld, H.J., Holte, K., Baugerod, H., Blomhoff, R., Haffner, K. (2004). Color of post-harvest ripened and vine ripened tomatoes (*Solanum esculentum* Mill.) as related to total antioxidant capacity and chemical composition. *International Journal of Food Science and Technology*, 39, 295-302.
- Woodrow, L., Liptay, A., Grodzinski, B., 1987. The effects of CO<sub>2</sub> enrichment and ethephon application on the production of tomato transplants. *Acta Hort.* 201, 133-140.
- Yang, C.C., Chinnan, M.S. (1988). Computer modeling of gas composition and color development of tomatoes stored in polymeric films. *Journal of Food Science*, 53, 869-872.
- Yelle, S., Beeson, R.C., Trudel, M.J., Gosselin, A., 1989. Acclimation of two tomato species to high atmospheric CO<sub>2</sub>. *Plant Physiol.* 90, 1465-1472.

Zhang, L., van der Werf, W., Bastiaans, L., Zhang, S., Li, B., Spiertz, J.H.J. (2008). Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton. *Field Crops REseach*, 107:29-42

Znidarcic, D., Ban, D., Oplanic, M., Karic, L., Pozrl, T., 2010. Influence of ppostharvest temperatures on physicochemical quality of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8, 21-25.

V. APÉNDICE A. PRODUCTOS GENERADOS DURANTE LA REALIZACIÓN DE LA  
TESIS DOCTORAL

**Artículos derivados de la tesis Doctoral:**

Artículo 1. Potential of mathematical modeling in fruit quality. 2010. *African Journal of Biotechnology*, 9, 260-267.

Artículo 2. Estimating the response of tomato (*Solanum lycopersicum*) leaf area to changes in climate and salicylic acid applications by means of artificial neural networks. 2012. *Biosystems Engineering*, 112, 319-327.

Artículo 3. Effect of maturity stage and storage on flavor compounds and sensory description of berrycactus (*Myrtillocactus geometrizans*). 2012. *Journal of Food Science*, 77, C366-C373.

Artículo 4. Functional properties and quality characteristics of bioactive compounds in berries: Biochemistry, biotechnology, and genomics. 2012. *Food Research International*, In Press, Corrected Proof. **(Vazquez-Cruz como autor de correspondencia)**

Artículo 5. Sensory and physicochemical quality of tomato fruits (*Solanum lycopersicum*) grown under different climatic conditions and applications of salicylic acid. **En revisión.** *Scientia Horticulturae*.

Artículo 6. Application of neural networks to correlate carotenoids content with leaf area and color development in tomato fruits (*Solanum lycopersicum*) during fruit ripening. **En revisión.** *Journal of Scientific and Industrial Research*.

Artículo 7. Global sensitivity analysis by means of EFAST and Sobol' methods and calibration of the reduced state-variable TOMGRO model using genetic algorithms. **En revisión.** *Computers and Electronics in Agriculture*.

**Capítulos de Libro:**

1. Capítulo: Aflatoxins Biochemistry and Molecular Biology - Biotechnological approaches for control in crops. Laura Mejia-Teniente, Angela Maria Chapa-Oliver, Moises Alejandro Vazquez-Cruz, Irineo Torres-Pacheco, and Ramon Gerardo Guevara-Gonzalez.

Libro: Aflatoxins: Detection, Measurement and Control. ISBN 978-953-307-711-6. InTech Editorial

2. Capítulo: Genetic resistance to drought in maize and its relationship in aflatoxins production. Ramon Gerardo Guevara-Gonzalez, Angela Maria Chapa-Oliver, Laura Mejia Teniente, Irineo Torres-Pacheco, Moises Alejandro Vazquez-Cruz, Juan Jesus Cervantes-Landaverde, Ricardo Ernesto Preciado-Ortiz and Ernesto Moreno-Martinez.

Libro: Aflatoxins - Biochemistry and Molecular Biology. ISBN 978-953-307-395-8. InTech Editorial

**Distinciones**

Revisor para el Journal of Food Research International (a partir de Noviembre del 2012)

Invitación extendida por el Editor Asociado Anderson de Souza Sant'Ana, Ph.D.

Apéndice B. Valores de los coeficientes estimados para cada una de las variables de calidad correspondientes a cada tratamiento.

Índice	Coeficientes					
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\varepsilon$	$\omega$
11	0.675329	0.614907	0.191002	0.247275	0.046063	0.482282
21	0.245418	0.099808	0.245738	0.317923	0.081928	0.859184
31	-0.602534	-0.123481	-0.019191	-0.024924	-0.034611	-0.362700
41	-1.114868	-0.181801	0.033726	0.044263	-0.031425	-0.332498
51	-0.697571	-0.031683	0.220311	0.285119	0.063281	0.663264
61	2.079504	0.591546	0.298295	0.385796	0.116847	1.226101
71	-1.218051	-0.529110	0.092115	0.119627	0.001561	0.014055
81	1.929396	1.272894	0.321747	0.416063	0.134650	1.413120
91	1.308626	0.332535	0.220562	0.285450	0.062763	0.657835
101	0.938572	0.063561	0.116132	0.150624	0.007924	0.081216
12	-0.065403	-0.044977	0.012395	0.015976	0.010037	0.105526
22	0.184691	-0.007006	0.012462	0.016065	0.010701	0.112477
32	-0.088272	-0.032169	0.002625	0.003331	-0.002066	-0.021412
42	0.023128	0.013117	0.009874	0.012715	0.006104	0.064274
52	0.041543	0.004909	0.012660	0.016320	0.010713	0.112602
62	-0.192903	-0.055997	0.012587	0.016229	0.011660	0.122518
72	0.073935	0.019020	0.010051	0.012943	0.006491	0.068336
82	0.191073	-0.113717	0.012357	0.015933	0.011707	0.123009
92	-0.124974	-0.019341	0.012734	0.016416	0.010832	0.113855
102	-0.080464	-0.005221	0.011129	0.014337	0.007879	0.082893
13	0.000778	0.000228	-0.000020	-0.000026	-0.000008	-0.000082
23	0.000057	0.000114	-0.000021	-0.000027	-0.000009	-0.000100
33	0.000311	0.000104	0.000002	0.000003	0.000013	0.000134
43	0.000179	0.000002	-0.000012	-0.000016	0.000000	0.000000
53	0.000061	0.000060	-0.000022	-0.000028	-0.000009	-0.000099
63	0.001245	0.000309	-0.000022	-0.000029	-0.000012	-0.000124
73	0.000217	0.000053	-0.000013	-0.000017	-0.000001	-0.000010
83	0.000355	0.000693	-0.000022	-0.000028	-0.000012	-0.000126
93	0.001409	0.000234	-0.000022	-0.000028	-0.000010	-0.000102
103	0.000413	0.000034	-0.000016	-0.000021	-0.000003	-0.000035

## Review

# Potential of mathematical modeling in fruit quality

M. A. Vazquez-Cruz<sup>1</sup>, I. Torres-Pacheco<sup>1</sup>, R. Miranda-Lopez<sup>2</sup>, O. Cornejo-Perez<sup>1</sup>, A. Roque Osornio-Ríos<sup>3</sup>, Rene Romero-Troncoso<sup>4</sup> and R. G. Guevara-Gonzalez<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Biosistemas, Division de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Queretaro, Cerro de las Campanas s/n, C.P. 76010, Queretaro, Qro, Mexico.

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Bioquímica, Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Tecnológico esq. Av. García Cubas s/n, Celaya, Guanajuato, 38000, Mexico.

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería, Campus-San Juan del Río Universidad Autónoma de Queretaro/Río Moctezuma 249, Col. San Cayetano, 76807, San Juan del Río, Queretaro, Mexico.

<sup>4</sup>Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica, Universidad de Guanajuato. Campus Salamanca, Universidad de Guanajuato/Carr. Salamanca-Valle Km. 3.5+1.8, Comunidad de Palo Blanco, 36700, Salamanca, Guanajuato, Mexico.

Accepted 17 December, 2009

**A review of mathematical modeling applied to fruit quality showed that these models ranged in resolution from simple yield equations to complex representations of processes as respiration, photosynthesis and assimilation of nutrients. The latter models take into account complex genotype-environment interactions to estimate their effects on growth and yield. Recently, models are used to estimate seasonal changes in quality traits as fruit size, dry matter, water content and the concentration of sugars and acids, which are very important for flavor and aroma. These models have demonstrated their ability to generate relationships between physiological variables and quality attributes (allometric relations). This new kind of hybrid models has sufficient complexity to predict quality traits behavior.**

**Key words:** Mathematical modeling, fruit quality, respiration, photosynthesis and assimilation of nutrients.

## INTRODUCTION

Fruit quality is a complex issue defined as a sophisticated chain of biological processes (Genard et al., 2007). These processes (transpiration, respiration, photosynthesis) involve exchanges between the fruit and its environment. Quantitative integration of these processes to monitor fruit's behavior is a task involving physiological modeling. Nowadays, the interest in mathematical modeling about the quality changes during fruit maturation has been increased (Wegehenkel and Mirschel, 2005). It is possible through simulation to evaluate the quality of final products in order to identify critical points during post-harvest handling and to adjust or improve the decision making related to harvest dates and product commercialization. Adequate models should be mechanistic enough to give a representative description of physiological processes and explain variations in some quality traits.

Recently, models have become more accurate and better able to predict the outcome of complex issues such as genotype-environment interactions. Furthermore, efforts have been made to define fruit quality and integrating it with crop growth models. These models are based on accurate descriptions of early stages of growth, including fresh fruit mass, dry matter content and concentration of sugars. The goodness-of-fit of a proposed model for each crop is evaluated taking into account the criterion of the root mean squared error (RMSE). This is a common parameter used to quantify the mean difference between predicted model and experimental data for the case of non-linear models (Quilot et al., 2005; Kobayashi and Us Salam, 2000).

The global goodness-of-fit of a model is computed by averaging the relative RMSE (RRMSE) of all experiments (Quilot et al., 2004). Spearman's rank correlation coefficients could also be calculated. These coefficients compare the ranking of experiments on the basis of observed and predicted values (Quilot et al., 2005). Given the economic importance of these quality traits, their

\*Corresponding author. E-mail: [ramon.guevara@uaq.mx](mailto:ramon.guevara@uaq.mx). Tel: +52 01 442 1921200 ext. 6093.

# Effect of Maturity Stage and Storage on Flavor Compounds and Sensory Description of Berrycactus (*Myrtillocactus geometrizans*)

Moises Alejandro Vazquez-Cruz, Sandra Neli Jimenez-Garcia, Irineo Torres-Pacheco, Salvador Horacio Guzman-Maldonado, Ramon Gerardo Guevara-Gonzalez, and Rita Miranda-Lopez

**Abstract:** Descriptive sensory analysis combined with a chemical analysis, provided insight regarding sensory significance for a better understanding of berrycactus' flavor. This study was based on the volatile components derived from the gas chromatography-olfactometry (GC-O) analysis. Four different ripening stages were used for the experiments: unripe, red, transition, and over-ripe. Besides red and transition stages were stored in sealed plastic bags for 7 d at 5 °C as an additional treatment in order to establish comparisons with fresh samples. GC-O analysis was performed following OSME (time-intensity) method. Moreover, chemical characterization was achieved through GC-MS analysis, each compound was tentatively identified by comparing its mass spectra with the spectra from the library NIST02, by its aroma notes and Kovats Index. The aroma descriptors found were: caramel, fruity, acetic acid, fresh, citrus, floral, and phenolics. Nine volatile compounds are among the most important in flavor of berrycactus: furfural, 5-methyl-2-furancarboxaldehyde, 2(5H)-furanone, 5-acetoxymethyl-2-furaldehyde, 2-cyclohexen-1-ol, octanoic acid ethyl ester, decanoic acid ethyl ester, octanoic acid, and phenylethyl alcohol. To better reflect the real responses of these compounds, the regression analysis of concentrations to ripening stages were performed. The 2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-(4H)-pyran-4-one was found in berrycactus, it has been reported in chemical profile of other berries as a product of heat-induced reactions, however, this compound has no aroma activity. The data suggest that both furanones and esters contribute to the aroma of berrycactus. On the other hand, solid phase microextraction was found to be more useful in detecting esters and acids whereas solvent extraction was more effective in detecting furanones and ketones.

**Keywords:** berrycactus, aroma, volatile compounds, SPME, solvent extraction

**Practical Application:** This information could contribute to setting up favorable processing conditions; in order to retain the best sensory characteristics of berrycactus along with functional properties that would enhance commercialization and exploitation of this fruit and to promote berrycactus cultivation programs.

## Introduction

In Europe, there is an increasing demand for various tropical fruits such as berries. This rising demand can be attributed to consumers' increased health consciousness, and interest in fruit consumption (Centeno 2005; Hughes 2008). Numerous studies have demonstrated that sensory characteristics, such as taste and aroma, along with appearance play an important role in the process of consumer acceptance and preference for berries, followed by health considerations (Miettinen 2004; Shimon 2006; Verbeke

2006). Most tropical fruits are so exotic in taste and other sensory attributes that this may act as an important opportunity to consumption (Sabbe and others 2009). For this type of fruits harvesting at the correct time is essential for optimum eating quality (Jayasena and Cameron 2008).

Berries are soft-fleshed being small fruits commonly consumed fresh, frozen, and dried, as well as processed into industrial products and functional food supplements. Commonly consumed species include: *Fragaria* (strawberries; *Rosaceae*), *Rubus* (raspberries, blackberries; *Rosaceae*), *Vaccinium* (blueberries, bilberries, cranberries; *Ericaceae*), and *Ribes* (currants, gooseberries; *Grossulariaceae*). Recently, berrycactus (*Myrtillocactus geometrizans*) has been added into the berry group. Berrycactus is an endemic cactaceae grown in wild areas of Central Mexico that are not usually considered suitable for agricultural activities (Céspedes and others 2005). It grows well without formal agronomic management; hence promoting cultivation of organic products (Fryxell 1993). Most recent research into the physicochemical properties of berrycactus focuses on betalains. It has been demonstrated that betalains have important antioxidant properties (Hernandez-Lopez and others 2008). The fruits are eaten fresh or processed in foods such as: ice cream,

MS 20110513 Submitted 4/22/2011, Accepted 1/5/2012. Authors Vázquez-Cruz, Jiménez-García, Torres-Pacheco, and Guevara-González are with Facultad de Ingeniería, CA Ingeniería de Biosistemas, Univ. Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n., Querétaro, Qro. C.P. 76010, Mexico. Author Guzmán-Maldonado is with Unidad de Biotecnología, Campo Experimental Bajío, Inst. Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), México Km. 6 Carretera Celaya-San Miguel Allende, Celaya, Gto. C.P. 38000, Mexico. Author Miranda-Lopez is with Dept. de Ingeniería Bioquímica, Inst. Tecnológico de Celaya, Av. Tecnológico esq. García Cubas s/n. Celaya, Gto. C.P. 38000, Mexico. Direct inquiries to author Miranda-Lopez (E-mail: rita.miranda@itcelaya.edu.mx).

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SciVerse ScienceDirect

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/issn/15375110](http://www.elsevier.com/locate/issn/15375110)

## Research Paper

# Estimating the response of tomato (*Solanum lycopersicum*) leaf area to changes in climate and salicylic acid applications by means of artificial neural networks

M.A. Vazquez-Cruz<sup>a</sup>, R. Luna-Rubio<sup>b</sup>, L.M. Contreras-Medina<sup>a</sup>, I. Torres-Pacheco<sup>a</sup>, R.G. Guevara-Gonzalez<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Division de Estudios de Posgrado, C.A. Ingenieria de Biosistemas, Facultad de Ingenieria, Universidad Autonoma de Queretaro, C.U. Cerro de las Campanas S/N, Colonia Las Campanas, C.P. 76010 Santiago de Queretaro, Queretaro, Mexico

<sup>b</sup>Division de Investigacion y Posgrado, Facultad de Ingenieria, Universidad Autonoma de Queretaro, Cerro de las Campanas s/n, C.P. 76010 Santiago de Queretaro, Queretaro, Mexico

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 25 November 2011

Received in revised form

14 April 2012

Accepted 6 May 2012

Published online 12 June 2012

Leaf area (LA) is a crucial biophysical variable that is indispensable for many physiological and agronomic models. A reliable and accurate model based on artificial neural networks (ANNs) is proposed to estimate LA of tomato growth under greenhouse conditions. The multi-layer perceptron (MLP) ANN topology was selected for the present study with 5 (ANN5) and three (ANN3) input variables, the architectures were 5-10-1 and 3-9-1, respectively. These MLPs were trained and tested to simulate the response of leaf area with linear measurements leaf length and width. In order to prove the selected topology the ANN was tested with data (leaf length and width) from different experimental growth conditions. Both models had good precision with root mean square errors (RMSEs) of 14.86 and 22.56 cm<sup>2</sup>, and mean absolute errors (MAEs) of 10.29% and 16.74%, and coefficients of determination ( $R^2$ ) of 0.94 and 0.89, respectively, indicating that the ANN5 model can accurately describe the complex relationship between climate factors (CO<sub>2</sub>, temperature, and radiation) in different treatments. LA development varied with the different treatments. For high levels of CO<sub>2</sub> and temperature, the LA tends to increase highly with respect to the observed area. Variable impact analysis was performed on the input variables; width and length were the variables which impacted the most on LA estimation. Temperature and salicylic acid (SA) concentration were the variables which affect the tomato LA development during the simulations. Overall, ANN models are a useful tool in investigating and understanding the relationships between LA development and climate factors under greenhouse conditions.

© 2012 Published by Elsevier Ltd on behalf of IAGrE.

## 1. Introduction

Leaf area (LA) plays an important role in plant growth analysis. LA is required in several physiological and agronomic

models to calculate growth indices as leaf area index (LAI), net assimilation rate (NAR), specific leaf area (SLA), and leaf area duration (LAD), as well as variables involved in studies of plant development, light interception, photosynthetic efficiency,

\* Corresponding author. Tel.: +52 01 442 1921200x6093.

E-mail address: [ramon.guevara@uaq.mx](mailto:ramon.guevara@uaq.mx) (R.G. Guevara-Gonzalez).

1537-5110/\$ – see front matter © 2012 Published by Elsevier Ltd on behalf of IAGrE.

doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.05.003





Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Food Research International

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/foodres](http://www.elsevier.com/locate/foodres)

## Review

## Functional properties and quality characteristics of bioactive compounds in berries: Biochemistry, biotechnology, and genomic

Sandra Neli Jimenez-Garcia<sup>a</sup>, Ramon Gerardo Guevara-Gonzalez<sup>a</sup>, Rita Miranda-Lopez<sup>b</sup>, Ana Angelica Feregrino-Perez<sup>c</sup>, Irineo Torres-Pacheco<sup>a</sup>, Moises Alejandro Vazquez-Cruz<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Division de Estudios de Posgrado, C.A. Ingeniería de Biosistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Queretaro, C.U. Cerro de las Campanas S/N, Colonia Las Campanas, C.P. 76010, Santiago de Queretaro, Queretaro, Mexico

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Bioquímica, Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Tecnológico esq. García Cubas s/n, Celaya, Gto. C.P. 38000, Mexico

<sup>c</sup> Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Queretaro, Clavel #200, Fraccionamiento Prados de la Capilla, C.P. 76176, Santiago de Queretaro, Queretaro, Mexico

## ARTICLE INFO

**Article history:**  
Received 29 September 2012  
Accepted 6 November 2012  
Available online xxxx

**Keywords:**  
Secondary metabolites  
Bioactive compounds  
Sensory profile  
Human health  
Quality

## ABSTRACT

This review summarizes biological active compounds of berry fruits and their importance in relation to human health. The group of bioactive compounds consists of phenolic compounds, including anthocyanins, phenolic acids, stilbens, tannins, and carotenoids. Berries are important sources of a wide variety of bioactive compounds. Under stress conditions, reactive oxygen species (ROS) and free radicals are produced in an extensive range during metabolism in plants. The insufficiency of antioxidant defense mechanisms in humans is associated to cardiovascular diseases, diabetes, and cancer. The extraction and characterization of bioactive compounds that may help to prevent these disorders and, as a consequence, delay the onset of aging is receiving major attention by researchers along with the generation of a detailed picture of the changing metabolic profiles during berries development. The studies regarding the bioavailability and potential toxicity of bioactive compounds also take part in this review. Finally, we would like to emphasize the importance of associate new plant breeding techniques and genetic studies in berry fruits. The promising research of quality trait loci (QTLs) during the analyses of expression and over-expression of bioactive compounds under controlled conditions in order to obtain value-added fruits for human health is also mentioned.

© 2012 Published by Elsevier Ltd.

## Contents

1. Introduction	0
2. Bioactive compounds in berries	0
3. Factors affecting bioactive compounds content and stability	0
4. Characterization techniques of bioactive compounds	0
5. Sensory analysis of berry compounds	0
6. Health benefits and bioavailability of berry compounds	0
7. Applications of berry bioactive compounds in pharmaceutical industry	0
8. Effect of processing conditions on bioactive compounds characteristics	0
9. Metabolomic engineering of berry bioactive compounds	0
10. Quality trait locus related to bioactive compounds production in berries	0
11. Future challenges	0
12. Conclusions	0
References	0

## 1. Introduction

The positive relationship between diet and health has increased consumer demand for more information related to healthy diets, including fruits and vegetables, with functional characteristics that

\* Corresponding author. Tel.: +52 1 442 1921200x6093.

E-mail address: [alejandrovazquez@uaq.mx](mailto:alejandrovazquez@uaq.mx) (M.A. Vazquez-Cruz).

# Genetic Resistance to Drought in Maize and Its Relationship in Aflatoxins Production

Ramón Gerardo Guevara-González et al.\*

*CA Ingeniería de Biosistemas. División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. C.U. Cerro de las Campanas, S/N, Colonia Las Campanas. C.P. 76010. Santiago de Querétaro, Querétaro, México*

## 1. Introduction

Maize (*Zea mays* L.) is one of the most important crops in the world. It is the third most important food grain crop in the developing world and is estimated that the demand for maize in developing countries will grow by 50%, from 558 million tons in 1995 to 837 million tons in 2020. Much of this increased demand will be needed by domestic supply for developing countries, which will require intensifying production on existing agricultural land (Ribaut and Ragot, 2007).

Drought is one of the prime abiotic stress in crops in the world. Crop yield losses due to drought stress are considerable. Particularly in maize, as an example, drought is the major stress affecting productivity in Africa leading up to 70% or total crop loss (Muoma et al., 2010; Ashraf, 2010). Although a variety of approaches have been used to alleviate the problem of drought, plant breeding, either conventional breeding or genetic engineering, seems to be an efficient and economic means of tailoring crops to enable them to grow successfully in drought-prone environments (Ashraf, 2010).

In turn, aflatoxins are found to contaminate a wide variety of important agricultural products such as corn, peanuts, tree nuts and cottonseed especially under extreme heat and drought conditions (Payne, 1998; Chen et al., 2003). Aflatoxin contamination significantly reduces the value of grain as an animal feed and export commodity (Chen et al., 2002).

---

\* Angela María Chapa-Oliver<sup>1</sup>, Laura Mejía-Teniente<sup>1</sup>, Irineo Torres-Pacheco<sup>1</sup>, Moises Alejandro Vazquez-Cruz<sup>1</sup>, Juan Jesús Cervantes-Landaverde<sup>2</sup>, Ricardo Ernesto Preciado-Ortiz<sup>3</sup> and Ernesto Moreno- Martinez<sup>4</sup>

<sup>1</sup> CA Ingeniería de Biosistemas. División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. C.U. Cerro de las Campanas, S/N, Colonia Las Campanas, C.P. 76010, Santiago de Querétaro, Querétaro, México,

<sup>2</sup> Biotecnología, Facultad de Química. Universidad Autónoma de Querétaro. C.U. Cerro de las Campanas, S/N, Colonia Las Campanas. C.P. 76010. Santiago de Querétaro, Querétaro, México,

<sup>3</sup> Campo Experimental Bajío. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Km 6.5 Carretera Celaya-San Miguel Allende, Celaya Gto. México,

<sup>4</sup> UNIGRAS, FES-Cuautitlán, UNAM, Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, Apdo. Postal 25. México.

# Aflatoxins Biochemistry and Molecular Biology - Biotechnological Approaches for Control in Crops

Laura Mejía-Teniente,  
Angel María Chapa-Oliver, Moises Alejandro Vazquez-Cruz,  
Irineo Torres-Pacheco and Ramón Gerardo Guevara-González  
*Facultad de Ingeniería, CA Ingeniería de Biosistemas,  
Universidad Autónoma de Querétaro,  
Centro Universitario Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, Qro,  
México*

## 1. Introduction

Fungi play a very important, but yet mostly unexplored role. Their widespread occurrence on land and in marine life makes them a challenge and a risk for humans (Bräse *et al.*, 2009). Fungi are ingenious producers of complex natural products which show a broad range of biological activities (Bohnert *et al.*, 2010). However, a specific characteristic is the production of toxins. Mycotoxins (from “myco” fungus and toxin), are nonvolatile, relatively low-molecular weight, fungal secondary metabolic products (Bräse *et al.*, 2009). The most agriculturally important micotoxins are aflatoxins (AF) which are a group of highly toxic metabolites, studied primarily because of their negative effects on human health. Aflatoxins belong to a group of difuranocoumarinic derivatives structurally related, and are produced mainly by fungi of genus *Aspergillus* spp. Its production depends on many factors such as substrate, temperature, pH, relative humidity and the presence of other fungi. It has been identified 18 types of aflatoxins; the most frequent in foods are B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>, M<sub>1</sub>, and M<sub>2</sub> (Bhatnagar *et al.*, 2002). These secondary metabolites contaminate a number of oilseed crops during growth of the fungus and this can result in severe negative economic and health impacts (Cary *et al.*, 2009). The higher levels of aflatoxins have been found in cotton and maize seeds, peanuts, and nuts. In grains like wheat, rice, rye or barley the presence of aflatoxins is less frequent. Mycotoxins may also occur in conjugated form, either soluble (masked mycotoxins) or incorporated into/ associated with/attached to macromolecules (bound mycotoxins). These conjugated mycotoxins can emerge after metabolization by living plants, fungi and mammals or after food processing. Awareness of such altered forms of mycotoxins is increasing, but reliable analytical methods, measurement standards, occurrence, and toxicity data are still lacking (Berthiller *et al.*, 2009). A variety of studies has been conducted in order to understand the process of crop contamination by aflatoxins. Mycotoxins are dangerous metabolites that are often carcinogenic, and they represent a serious threat to both animal and human health (Reverberi *et al.*, 2010). Mycotoxins are considered secondary metabolites because