



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRICOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

**FISIOLOGIA VEGETAL**

**FENOLOGIA, PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD DE FRUTO**

**CON Y SIN SEMILLA EN *Opuntia ficus-indica***

***CARLOS HERNÁNDEZ RAMÍREZ***

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL  
GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO**

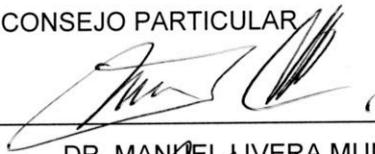
**2009**

La presente tesis, titulada: **Fenología, productividad y calidad de fruto con y sin semilla en *Opuntia ficus-indica***, realizada por el alumno: **Carlos Hernández Ramírez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS  
FISIOLOGIA VEGETAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



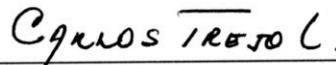
DR. MANUEL LIVERA MUÑOZ

ASESOR:



DRA. ADRIANA DELGADO ALVARADO

ASESOR:



DR. CARLOS TREJO LÓPEZ

ASESOR:



DR. VÍCTOR A. GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

ASESOR:



DR. JOSÉ ALFREDO CARRILLO SALAZAR

Montecillo, Texcoco, México, 23 de julio de 2009

---

## FENOLOGIA, PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD DE FRUTO CON Y SIN SEMILLA EN *Opuntia ficus-indica*

Carlos Hernández Ramírez, Dr.  
Colegio de Postgraduados, 2009.

El nopal tunero es una alternativa productiva importante para las zonas áridas y semiáridas de México. La superficie de cultivo es de 53 212 ha bajo riego y temporal. Un problema que enfrenta el productor es la estacionalidad de la producción y la presencia de semillas en la pulpa. Investigadores mexicanos han obtenido logros importantes en la producción de tuna sin semilla en *Opuntia ficus-índica* cv. CP-Azteca de frutos con pulpa color rojo, que también se utilizó en esta investigación que comprende tres temas y que se presentan en tres capítulos.

Los objetivos y resultados del trabajo fueron: I) Caracterizar en días y grados día acumulados los períodos desde la emergencia de yemas reproductivas a antesis y a maduración del fruto así como analizar el comportamiento de la apertura y cierre floral. El diseño experimental fue completamente al azar y con tratamientos de riego y temporal. El número de días requeridos de yema a antesis fue disminuyendo conforme fueron más tardías las fechas de emergencia pero los grados día de desarrollo fueron similares. Las flores abrieron y cerraron uno, dos y tres días. La humedad relativa y contenido de agua en el suelo no tuvo efecto sobre los días de apertura y cierre floral; II) Comparar la calidad de frutos sin semilla con la de frutos normales. La unidad experimental fueron dos plantas y diez el número de repeticiones. El diseño experimental fue completamente al azar. Los frutos con inducción de partenocarpia resultaron 100 % sin semilla; sus dimensiones, peso y contenido de fibra fue significativamente menor, pero su densidad y relación cáscara/pulpa fue mayor. La pulpa en relación a sólidos solubles totales, acidez titulable, azúcares totales y reductores, ácido ascórbico y contenido calórico fue similar al fruto con semilla; III) Evaluar la eficiencia en el uso de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) en la síntesis de biomasa y el uso eficiente del agua bajo condiciones de riego y temporal. El diseño fue de bloques completos al azar con veinte repeticiones. La unidad experimental consistió en una planta. La eficiencia en la conversión de RFA en biomasa fue mayor en condiciones de riego (1.94 %) que en temporal (1.27 %), pero la eficiencia en el uso del agua fue mayor en condiciones de temporal (1.49 kg<sub>(MS)</sub> t<sup>-1</sup><sub>(agua)</sub>) que en riego (1.08 kg<sub>(MS)</sub> t<sup>-1</sup><sub>(agua)</sub>).

Palabras clave: *Opuntia ficus-índica*, antesis, grados día de desarrollo, fruto partenocárpico, radiación fotosintéticamente activa, uso eficiente del agua.

## PHENOLOGY, PRODUCTIVITY AND QUALITY OF SEEDED AND SEEDLESS FRUIT IN *Opuntia ficus-indica*

Carlos Hernández Ramírez, Dr.  
Colegio de Postgraduados, 2009.

The cactus pear is an important productive alternative for arid and semiarid regions of Mexico. The cultivated area is 53 212 ha under irrigation and rainfall conditions. One problem facing the producer is the seasonality of fruit production and the presence of seeds in the pulp. Mexican researchers have gained important achievements in the production of seedless prickly pear in *Opuntia ficus-indica* cv. CP-Aztec with red-fleshed fruits, also used in this research comprising three subjects which are presented as three chapters.

The objectives and results of this study were: I) Characterize the timing of reproductive bud break, anthesis and fruit ripening; to determine the thermal requirements for the last two stages, and to analyze the behavior of flower opening and closing. A completely randomized experimental design was used with watering and rainfall as treatments. The number of days required from bud break to anthesis was different for early and late bud emergence dates, but the growing degree days requirement was similar. The flowers opened and closed one, two or three days. Relative humidity and soil water content did not affect the number of days of floral opening and closing; II) To compare the quality of seedless and seeded fruits. The experimental unit consisted of two plants and ten replications. A randomized complete block experimental design was used. With the induction of parthenocarpy fruits with no seeds were obtained; its size, weight and fiber content was significantly lower, but its density and ratio of peel/pulp was higher. The pulp in relation to total soluble solids, acidity, total sugars and reducing sugars, ascorbic acid and caloric content was similar to seed-bearing fruits; III) To Evaluate the efficiency of *Opuntia ficus-índica* cv. CP-Azteca in the use of the photosynthetically active radiation (PAR) and water in the synthesis of biomass under irrigation and rainfall conditions. A randomized complete block experimental design was used with twenty replications. The experimental unit consisted of one plant. The PAR use efficiency was higher under irrigation (1.94 %) as compared to rainfall conditions (1.27 %), but the water use efficiency was higher under rainfall conditions ( $1.49 \text{ kg}_{(MS)} \text{ t}^{-1}_{(water)}$ ) than in irrigation ( $1.08 \text{ kg}_{(MS)} \text{ t}^{-1}_{(water)}$ ).

**Keywords:** *Opuntia ficus-indica*, anthesis, growing degree days, parthenocarpic fruit, photosynthetic active radiation, water use efficiency.

Dedico esta tesis a:

Los millones de mexicanos que pagan impuestos, quienes, a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el Colegio de Postgraduados, han financiado parte de mi formación;

Las personas integrantes de mi Consejo Particular por el esfuerzo, la dedicación, el tiempo y el apoyo que me han brindado, pero sobre todo por la paciencia para conmigo y mis problemas;

Mi familia quienes siempre me han apoyado tanto moral como económicamente, aun en la distancia.

Este trabajo de investigación fue apoyado por la Secretaría Educación Pública a través de la Brigada de Educación para el Desarrollo Rural No. 62, dependiente de la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria de la Subsecretaría de Educación Media Superior, a quien expreso mi agradecimiento.

Agradezco:

Al Dr. Manuel Livera Muñoz quien fungió como mi Profesor Consejero, por su destacado papel como científico y profesor, por su acertada dirección en el trabajo de investigación y por su aportación en la redacción de la tesis. Por su calidad humana y sencillez, cualidades que contribuyeron para que me alentara a seguir trabajando en los momentos difíciles y por su amistad y acertados consejos.

A la Dra. Adriana Delgado Alvarado, al Dr. Carlos Trejo López, al Dr. Víctor A. González Hernández y al Dr. José Alfredo Carrillo Salazar, profesores integrantes de mí Consejo Particular, a quienes admiro por su capacidad intelectual y su calidad humana, y que siempre me apoyaron para salir adelante con la investigación, los exámenes de candidatura doctoral y la tesis. Agradezco su amistad y acertados consejos.

A la Dra. Ma. Cristina López Peralta y a la Lic. Ma. Del Carmen Padilla Pastrana por su apoyo para presentar el examen de grado.

Al personal y compañeros del Programa de Fisiología Vegetal del Colegio de Postgraduados por las facilidades y apoyo brindados durante mis estudios.

A mi familia por el apoyo incondicional.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN <b>GENERAL</b> .....	1
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	6
CAPÍTULO I. BROTACIÓN DE YEMAS, APERTURA Y CIERRE FLORAL Y MADURACIÓN DEL FRUTO EN <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) MILL.	
RESUMEN .....	8
1.1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
1.4 CONCLUSIONES.....	20
1.5 LITERATURA CITADA.....	20
CAPÍTULO II. CALIDAD DE FRUTOS CON Y SIN SEMILLA EN <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) MILL. CV. CP-AZTECA	
RESUMEN.....	23
2.1 INTRODUCCIÓN.....	24
2.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
2.4 CONCLUSIONES.....	43
2.5 LITERATURA CITADA.....	43
CAPÍTULO III. EFICIENCIA DE <i>Opuntia ficus-índica</i> cv. CP-AZTECA EN EL USO DE LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA Y DEL AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN CONDICIONES DE RIEGO Y TEMPORAL	
RESUMEN.....	48
3.1 INTRODUCCIÓN.....	49
3.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	52
3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
3.4 CONCLUSIONES.....	59
3.5 LITERATURA CITADA.....	59
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b> .....	62

## LISTA DE FIGURAS

	Página
<b>CAPÍTULO I. BROTAÇÃO DE YEMAS, APERTURA Y CIERRE FLORAL Y MADURACIÓN DEL FRUTO EN <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) MILL.</b>	
Figura 1.1 Seguimiento de la apertura floral con duración de dos días	16
Figura 1.2 Seguimiento de la apertura floral con duración de tres días, mayo del 2001	17
<b>CAPÍTULO II. CALIDAD DE FRUTOS CON Y SIN SEMILLA EN <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Mill CV. CP-AZTECA</b>	
Figura 2.1 Frutos partenocárpicos de <i>O. ficus-indica</i> cv. CP-Azteca completos (izquierda) y corte longitudinal (derecha)	37
Figura 2.2 Fruto normal (izquierda) y partenocárpico (derecha) de <i>O. ficus-indica</i> cv. CP-Azteca	37
Figura 2.3 Frutos de <i>O. ficus-indica</i> cv. CP-Azteca con semilla	38
Figura 2.4 Crecimiento de frutos con y sin semilla de <i>Opuntia ficus-indica</i> CP-Azteca en (A) altura del fruto y (B) diámetro de fruto. Los datos graficados son medias y desviaciones estándar de 30 frutos.	39

## LISTA DE CUADROS

	Página
<b>CAPÍTULO I. BROTAÇÃO DE YEMAS, APERTURA Y CIERRE FLORAL Y MADURACIÓN DEL FRUTO EN <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) MILL.</b>	
Cuadro 1.1	Valores de las principales propiedades físicas del suelo 12
Cuadro 1.2	Días y GDD de emergencia de yema (E) a antesis (A) y madurez de fruto (M) en <i>O. ficus-indica</i> cv. CP-Azteca 14
Cuadro 1.3	Precipitación anual en Montecillo y Tepetlaoxtoc 15
Cuadro 1.4	Porcentaje de apertura para diferentes especies en 2005, 2006 y 2007 16
<b>CAPÍTULO II. CALIDAD DE FRUTOS CON Y SIN SEMILLA EN <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Mill CV. CP-AZTECA</b>	
Cuadro 2.1	Dimensiones y densidad de tunas con y sin semilla de <i>O. ficus-indica</i> cv. CP-Azteca. 38
Cuadro 2.2	Contenido de SST en tunas con y sin semilla de <i>O. ficus-indica</i> cv. CP-Azteca 40
Cuadro 2.3	Contenido de azúcares en tunas con y sin semilla de <i>O. ficus-indica</i> cv. CP-Azteca 41
Cuadro 2.4	Contenido de ácido ascórbico en tunas con y sin semilla de <i>O. ficus-indica</i> var. CP-Azteca 41
Cuadro 2.5	Contenido de fibra en tunas con y sin semilla de <i>O. ficus-indica</i> var. CP-Azteca 42
Cuadro 2.6	Contenido calórico en tunas con y sin semilla de <i>O. ficus-indica</i> cv. CP-Azteca 42
Cuadro 2.7	Biomasa en tunas con y sin semilla de <i>O. ficus-indica</i> cv. CP-Azteca 43

CAPÍTULO III. EFICIENCIA DE *OPUNTIA FICUS-ÍNDICA* CV. CP-AZTECA EN EL USO DE LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA Y DEL AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN CONDICIONES DE RIEGO Y TEMPORAL

Cuadro 3.1	Valores de las principales propiedades físicas del suelo	55
Cuadro 3.2	RFA reflejada, transmitida, e interceptada por <i>O. ficus-indica</i> en condiciones de riego y temporal, durante el período de enero a julio del 2006	56
Cuadro 3.3	Promedios de biomasa sintetizada en frutos, cladodios y flores en <i>O. ficus-indica</i> cv. CP-Azteca por unidad experimental bajo condiciones de riego y temporal	57
Cuadro 3.4	Contenido energético de un gramo de biomasa de fruto, cladodio y flor en <i>Opuntia ficus-indica</i> cv. CP-Azteca bajo condiciones de riego y temporal	58
Cuadro 3.5	Eficiencia en la transformación de la RFA en biomasa en <i>Opuntia ficus-indica</i> cv. CP-Azteca	58

## INTRODUCCIÓN GENERAL

El nopal está ampliamente distribuido en el continente Americano, desde Canadá hasta Argentina, y de América se ha distribuido a diferentes partes del mundo. En México, 49.2 % del territorio está conformado por tierras secas, de las cuales 0.2 % son zonas hiperáridas, 28.3 % áridas, 23.7 % semiáridas y 17.6% subhúmedas secas, que se encuentran en el centro y norte del país (Sene, 1996). La producción de tuna (*Opuntia spp.*) puede ser una alternativa para los habitantes de las zonas áridas y semiáridas, pues la mayor superficie de México corresponde a estos ambientes, donde es incosteable la producción de otros cultivos como el maíz, que requieren suelos fértiles y cantidades de agua no disponibles en estas áreas (Callejas *et al.*, 2009) efecto agudizado con la presencia de vientos fuertes y secos, cambios bruscos de temperatura durante el día y deficiencia de nutrientes en el suelo. La evolución del género *Opuntia* en este tipo de ambientes ha conducido al desarrollo de características morfológicas y fisiológicas que le han permitido su establecimiento y reproducción.

México es el principal productor de tuna (Flores *et al.*, 1995; Inglese *et al.*, 2002; SIAP, 2007) y cuenta con la mayor diversidad genética del género *Opuntia* (Flores y Gallegos, 1993). En frutales, la tuna ocupó 3.5 % de la superficie nacional cosechada (98 % de temporal y 2 % de riego), 2.2 % del volumen producido (366 354 t) y 1.9 % del valor de la producción en el año 2005 y los principales productores de tuna fueron el estado de México y Zacatecas, con 44.5 y 25.1 % del total nacional (Callejas *et al.*, 2009). Los estados con los rendimientos más altos de tuna en el período 2000-2005 fueron Puebla (19 t ha<sup>-1</sup>) y México (11 t ha<sup>-1</sup>). En el mismo período las exportaciones de tuna a los Estados Unidos crecieron 106.4 %, lo que se atribuye al crecimiento de la población latina (Callejas *et al.*, 2009). En el año 2006 la superficie dedicada a su cultivo fue de

53 212 ha bajo riego y temporal, con un valor de la producción de \$824'782,840.00 (SIAP, 2007).

Los frutos del nopal conocidos en México como tunas, son comestibles, así como los cladodios tiernos (nopalitos) que se consumen como verdura; los frutos y tallos tiernos y maduros también pueden servir de forraje al ganado. Otro uso es el medicinal (Inglese *et al.*, 2002). Los frutos de *Opuntia spp.* son apreciados por su sabor agradable pero tienen como principal objeción la gran cantidad de semillas en la pulpa, por lo que se ha intentado obtener frutos partenocárpicos. La partenocarpia es el desarrollo de un fruto sin la fertilización de los óvulos, y puede ser inducida por aplicación de varios productos (Bangerth y Schröder, 1994). Investigadores mexicanos han obtenido logros importantes en la producción de tuna sin semilla en *Opuntia ficus-índica* cv. CP-Azteca de frutos con pulpa color rojo-vino.

Otro problema que enfrenta el productor de tuna es la estacionalidad de la producción, que se concentra en los meses de agosto y septiembre con la consecuente baja en el precio de venta. Esto ocurre en la mayoría de las regiones tuneras del país, incluyendo 40% de la superficie cultivada con la variedad Reyna. Callejas *et al.*, (2009), consideran que la oferta estacional de la tuna se debe a que la mayor parte de la superficie cosechada es de temporal que aunado al mal manejo de las unidades de producción, propician la acumulación de la producción en pocos meses y una caída del precio y consideran que la industrialización de la tuna sería una alternativa viable para resolver el problema del exceso de producción, cuando ésta no se cosecha o no se vende por la saturación de mercado del Distrito Federal y el área metropolitana.

Para obtener fruta fuera del período mencionado se requiere explorar diversas posibilidades de manejo como el uso de nuevas variedades y técnicas de producción (riego, nutrición, podas, etc.), entre otras. En cualquier alternativa se requiere conocer

la fenología del genotipo de interés, ya que la ocurrencia de etapas del desarrollo, como la emergencia de yemas reproductivas, antesis y madurez del fruto, depende de factores del ambiente. El conocimiento de tal dependencia o relación podría ayudar a modificar la fenología floral, tema que se ha estudiado poco en cactáceas. Una característica de estas plantas es que el desarrollo de la flor es asincrónico; es decir, en un momento determinado se pueden encontrar simultáneamente yemas reproductivas, flores en antesis y frutos jóvenes y algunas especies pueden tener una segunda floración (Inglese *et al.* 2002).

El momento de la apertura floral (antesis) marca el inicio de la polinización de flores, que en nopal pueden ser hermafroditas o unisexuales (*O. robusta*). Los mecanismos de apertura y cierre tienen interés desde varios puntos de vista (fisiológico, molecular, etc.). Desde el biológico, tienen importancia para la reproducción de la especie y su variabilidad genética.

Las flores de las cactáceas generalmente abren y cierran el mismo día. Además, el perianto de las flores del nopal presenta cambios en la coloración durante la apertura y cierre (Rosas, 1984). En algunos casos la dehiscencia de anteras se presenta previamente a la apertura, fenómeno conocido como *cleistogamia preantesis* que promueve la autopolinización (Rosas, 1984; Rosas y Pimienta, 1986). La inducción floral en nopal y cactáceas en general es un proceso poco estudiado; sólo se ha señalado que ocurre cuando las temperaturas son relativamente bajas (Inglese *et al.* 2002; Pimienta y del Castillo, 2002).

En nopal (*Opuntia sp.*) los cladodios interceptan la radiación solar necesaria para fotosíntesis; por tanto, el cultivo debe desarrollar suficiente área para una máxima interceptación de radiación y para la síntesis de los carbohidratos necesarios para su desarrollo (Monteith y Unsworth, 1990; Jones, 1992; Otegui *et al.*, 1995). El primer

efecto de una disponibilidad baja de radiación fotosintéticamente activa (RFA) es una reducción de la fotosíntesis y del aporte de fotoasimilados para la producción de biomasa (Hashemi-Dezfouli y Herbert, 1992; Westgate *et al.*, 1997).

Con un manejo que incluya riegos oportunos y fertilización el rendimiento del cultivo estará en función de la intercepción de RFA y su repercusión en la acumulación neta de bióxido de carbono durante el ciclo de crecimiento (Gallagher y Biscoe, 1978; Otegui *et al.*, 1995). Esto, a su vez, es función de la tasa de intercepción de la radiación solar y la eficiencia del uso de dicha energía para la fijación de moléculas de CO<sub>2</sub> (Shibles y Weber, 1965; Jones, 1992).

La productividad refleja los efectos acumulativos de los diferentes factores que influyen sobre el crecimiento. En los ambientes naturales los factores que pueden limitar el crecimiento son: la disponibilidad de agua en el suelo, la temperatura, el flujo de fotones fotosintéticos (FFF) y el contenido de nutrimentos en el suelo (Nobel, 1998). La producción potencial de un cultivo expresada como biomasa total, si se considera que no hay algún otro factor limitante, será función de la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada. Se han establecido relaciones lineales entre la productividad potencial y la cantidad de radiación interceptada (RFA<sub>INT</sub>) (Gallagher y Biscoe, 1978). La eficiencia de captación de radiación de un dosel podría evaluarse por medio de los índices de reflectividad e intercepción de la radiación: un dosel eficiente deberá tener un índice alto de intercepción de la RFA y una reflectividad alta a la banda de radiación cercano al infrarrojo (0.74-1.2 μm), para así reducir los efectos del calentamiento de las hojas y de la tasa de transpiración ocasionadas por la radiación infrarroja (Maddonni y Otegui, 1996).

La eficiencia en el uso de la radiación puede ser calculada por comparación entre el valor energético de la materia orgánica producida por unidad de área cultivada y la

radiación incidente en la misma área en el mismo período (Ortiz, 1987). La eficiencia del crecimiento, definida como la energía equivalente de materia seca (biomasa) por unidad de energía interceptada, tienen un valor entre 2 y 2.5 % para diferentes cultivos (Monteith, 1981) y se han encontrado valores de 1.3 a 4.2 g MJ<sup>-1</sup> considerándose como límite teórico 6.4 g MJ<sup>-1</sup>. Rosenberg *et al.*, (1983) (citados por Ayala, 1995), consideran que las mejores prácticas de cultivo rinden eficiencias fotosintéticas no más grandes al 1 % de la radiación global incidente. Kirkham y Smith (1984) (citados por Ayala, 1995), señalan que si los cultivos sólo utilizan entre 1 y 2 % de la energía disponible, el objetivo primario de las investigaciones agrícolas debería ser incrementar la RFA interceptada por los doseles a través de prácticas agrícolas como el riego y la fertilización.

## LITERATURA CITADA

- Ayala Garay O J (1995) Estudio Micrometeorológico del Cultivo de Trigo (*Triticum aestivum* L.) en Montecillo, México. Tesis de Licenciatura, Ingeniero Agrónomo especialista en Fitotecnia. U.A.Ch., Chapingo, Méx. México. 221 p.
- Baugerth F, M Schröder (1994) Strong synergistic effects of gibberellins with the synthetic effects of gibberellins with the synthetic cytokinin N-(2-chloro-4pyridyl)-N-Pheny/urea on parthenocarpic fruit set and some other fruit characteristics of apple. *Plant Growth Regulation* 15:293-302.
- Callejas Juárez N, J A Matus-Gardea, J A García-Salazar, M A Martínez-Damián, J M Salas-González (2009) Situación actual y perspectivas de mercado para la tuna, el nopalito y derivados en el estado de México, 2006. *Agrociencia* 43: 73-82.
- Flores V C A, C Gallegos V (1993) Situación y perspectivas de la producción y comercialización de tuna en la región centro y norte de México. CRUCEN-CIESTAAM, Universidad Autónoma Chapingo. pp:5-27.
- Flores V C A, J M de Luna E, P P Ramírez M (1995) Mercado Mundial del Nopalito. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo México. 176 p.
- Gallagher J N, P V Biscoe (1978) Radiation absorption, growth and yield of cereals. *J. Agric. Sci. Camb.* 91: 47-60.
- Hashemi-Dezfouli A, S J Herbert (1992) Intensifying plant density response of corn with artificial shade. *Agron. J.* 84: 547-555.
- Inglese P, F Basile, M Schirra (2002) Cactus pear fruit production. *In*: Nobel P S (ed.). *Cacti Biology and Uses*. University of California Press, USA. Pp. 163-183.
- Jones G H (1992) *Plants and Microclimate. A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Second edition. Cambridge University Press. Cambridge, Great Britain. 428 pp.
- Kirkham M B, E L Smith (1984) Solar intensity on winter wheat leaves. *Field Crop Research* 8(4): 297-306
- Maddonni G A, M E Otegui (1996) Leaf area, Light interception and crop development in maize. *Field Crop Res.* 48: 1, 87-87.
- Monteith J L (1981) Does light limit crop production? En: *Physiological Processes Limiting Plant Productivity* (Ed. por Johnson, C B) Butterworths, Londres Gran Bretaña. pp. 23-38
- Monteith J L, M H Unsworth (1990) *Principles of Environmental Physics*. Second edition, Chapman and Hall, Inc. London, United Kingdom. 291 p.

- Nobel P S (1998) Los incomparables agaves y cactus. México. Trillas. 211pp.
- Otegui M E, M G Nicolini, R A Ruiz, P A Dodds (1995) Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron. J.* 87: 29-33.
- Ortiz S C A (1987) Elementos de agrometeorología cuantitativa. Depto. de Suelos. U.A.Ch, México. 327pp.
- Pimienta B E (1990) El nopal tunero. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México. 246 p.
- Pimienta-Barrios E, R F del Castillo (2002) Reproductive Biology. *In: Cacti Biology and Uses.* P S Nobel (ed). University of California Press. USA. pp. 75-90.
- Rosas C M P (1984) Polinización y fase progámica en *Opuntia spp.* Tesis Profesional. Universidad Michoacana de San Nicolás del Hidalgo, Morelia, Michoacán.
- Rosas C M P, E B Pimienta (1986) Polinización y fase progámica en nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) tunero. *Fitotecnia*:164-176.
- Rosenberg N J, B L Blad, S D Verma (1983) Microclimate. The Biological Environment. Jhon Wiley and Sons, Inc. New York. EUA 495 pp.
- Sene E H (1996) The potential of Prosopis in the conservation and development of drylands. The FAO perspective. *In: Prosopis: Semi-arid Fuelwood and Forage Tree. Building Consensus for the Disenfranchised.* Felker, P., and J. Moss (eds). Center Semi-Arid Forest Resources Publ. Kingsville, Texas: 6.53-6.59.
- SIAP (2007) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (<http://www.siap.gob.mx/>). (19 de Septiembre de 2007)
- Westgate M E, F Forcella, D C Reicosky, J Somsen (1997) Rapid canopy closure for maize production in the northern U S corn belt: Radiation use efficiency and grain yield. *Field Crop Res.* 49: 249-258.

CAPÍTULO I  
BROTACIÓN DE YEMAS, APERTURA Y CIERRE FLORAL Y  
MADURACIÓN DEL FRUTO EN *Opuntia ficus-indica* (L.) MILL.

RESUMEN

Producir tuna fuera de estación requiere nuevas técnicas de producción y variedades, siendo importante conocer su fenología. Los objetivos del trabajo fueron caracterizar el tiempo de emergencia de yemas reproductivas, antesis y maduración del fruto; determinar los requerimientos térmicos de las dos últimas etapas, y analizar el comportamiento de la apertura y cierre floral en *Opuntia ficus-índica* cv. CP-Azteca de frutos rojos. Se efectuó en los años 2001, 2002, 2003, 2005, 2006 y 2007 en Tepetlaoxtoc, Estado de México. Se utilizaron plantas de cuatro años de edad. El diseño experimental fue completamente al azar con 20 a 50 repeticiones y se estudiaron tratamientos de riego y temporal; también se analizó la apertura floral de *O. amyclaea*, *O. robusta* y *O. strepthacantha*. Se calcularon los grados día de desarrollo (GDD) requeridos para antesis y madurez (M) de fruto a partir de la emergencia de yemas, con un método residual usando 0 °C como temperatura base. Las que emergieron en febrero requirieron 68 días (d) para llegar a antesis y 172 para M; los correspondientes GDD fueron 1126 y 2618. Las que emergieron en abril, requirieron 42 d para antesis y 152 para M; los correspondientes GDD fueron 1129 y 2613. En promedio las yemas de CP-Azteca requieren 51 d para antesis y 160 para M; los correspondientes GDD fueron 1132, y 2621. El método utilizado en la determinación de GDD, por su consistencia, resultó ser adecuado para caracterizar los requerimientos térmicos. En 2001 las flores del cv. CP-Azteca abrieron y cerraron tres días y en los años 2002 y 2003 sólo uno; en 2005, 2006 y 2007 abrieron dos; las otras especies abrieron y cerraron uno o dos. La humedad relativa y contenido de agua en el suelo no tuvieron efecto sobre los días de apertura y cierre floral.

Palabras clave: *Opuntia ficus-indica*, antesis, cv. CP-Azteca, fenología, grados día de desarrollo, yemas reproductivas.

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El nopal tunero es una alternativa productiva importante para las zonas áridas y semiáridas de México; la superficie dedicada a su cultivo es de 53 212 ha bajo riego y temporal, con un valor de la producción de \$824'782,840.00 (SIAP, 2007). Un problema que enfrenta el productor es la estacionalidad de la producción, que se concentra en los meses de agosto y septiembre con la consecuente baja en el precio de venta. Esto ocurre en la mayoría de las regiones tuneras del país, incluyendo 40% de la superficie cultivada con la variedad Reyna. En la región tunera del Estado de México, aledaña a San Juan Teotihuacán, se cultivan más de 7 mil ha con esta variedad (Chapman *et al.* 2002).

Para obtener fruta fuera del período mencionado se requiere explorar diversas posibilidades de manejo como el uso de nuevas variedades y técnicas de producción (riego, nutrición, podas, etc.), entre otras. En cualquier alternativa se requiere conocer la fenología del genotipo de interés, ya que la ocurrencia de etapas del desarrollo, como la emergencia de yemas reproductivas, antesis y madurez del fruto, depende de factores del ambiente. El conocimiento de tal dependencia o relación podría ayudar a modificar la fenología floral, tema que se ha estudiado poco en cactáceas. Una característica de estas plantas es que el desarrollo de la flor es asincrónico; es decir, en un momento determinado se pueden encontrar yemas reproductivas, flores en antesis y frutos jóvenes simultáneamente y algunas especies pueden tener una segunda floración (Inglese *et al.* 2002).

En nopal se ha tratado de aprovechar la sobre posición de etapas en la producción forzada destinada a cosechar fuera de temporada y así obtener mejor precio. Zegbe y Mena-Covarrubias (2008 b) lograron retrasar en 45 días la cosecha del cv. "Cristalina", pero el rendimiento se redujo 65 %. *O. ficus-indica* tiene la capacidad de reflorecer a diferentes tiempos en forma natural o con prácticas inductivas (Nerd y Mizrahi, 1997), capacidad que se utiliza en Italia para obtener una segunda floración después de remover completamente el flujo primaveral de flores y nuevos cladodios, y así cosechar frutos maduros en octubre y noviembre; esta práctica también se utiliza en Sudáfrica y se está investigando en Argentina (Ochoa *et al.* 2009); en Chile esta especie baja su rendimiento con este tipo de manejo (Inglese *et al.* 2002). En la mayoría de estudios de la fenología del nopal tunero, no se ha relacionado la ocurrencia de antesis y maduración de frutos con la acumulación de unidades térmicas, como se ha hecho en

cultivos anuales en los que se han desarrollado modelos para predecir la ocurrencia de diferentes etapas fenológicas (Warrington y Kanemasu, 1983; Hodges, 1991). Sólo Inglese *et al.* (2002) relacionaron el período de la antesis a maduración con tiempo térmico acumulado y Aounallah *et al.* (2009) hicieron la relación de estados fenológicos desde emergencia de la yema a amarre de fruto. En México no se encontró información sobre el tema.

El momento de la apertura floral (antesis) marca el inicio de la polinización de flores, que en nopal pueden ser hermafroditas o unisexuales (*O. robusta*). En algunas especies no cactáceas las flores se mantienen abiertas por varios días, hasta que ocurre el cierre, marchitamiento o abscisión de pétalos. En otras especies el período de apertura floral se alterna con períodos de cierre, proceso complejo que depende de factores internos y externos poco entendidos (van Doon y van Meeteran, 2003). Las especies que abren por la mañana responden principalmente a diferencias de temperatura entre la noche y el día; la superficie interna del pétalo crece rápidamente cuando aumenta, mientras que la superficie externa lo hace con temperaturas más bajas (Tanaka *et al.* 1987; Phillips y Kende, 1980).

El cierre floral puede deberse al crecimiento diferenciado de los pétalos o a cambios reversibles de turgencia, y a la pérdida de turgencia por senescencia. La apertura y cierre floral también se pueden deber a la extensión y contracción reversible de las células. La osmolaridad de la epidermis superior puede ser mayor durante el día que durante la noche, lo que se atribuye a un suministro reversible de iones (Schrenpf, 1977, 1980). Los mecanismos de apertura y cierre tienen interés desde varios puntos de vista (fisiológico, molecular, etc.). Desde el biológico, tienen importancia para la reproducción de la especie y su variabilidad genética.

Las flores de las cactáceas generalmente abren y cierran el mismo día. La apertura floral de *Opuntia* típicamente dura de 8 a 11 h, aunque algunas flores pueden abrir un segundo día (Pimienta y del Castillo, 2002). Además, el perianto de las flores del nopal presenta cambios en la coloración durante la apertura y cierre (Rosas, 1984). Pimienta (1990) clasifica las flores del nopal en dos tipos, “A” y “B”; la tipo “A” inicia su apertura a las 9:00 h y su cierre ocurre a partir de las 18:00 h, y no vuelven a abrir; la tipo “B” inicia la apertura a las 15:00 h, cierra a las 19:00 h y abre nuevamente al día siguiente como la flor tipo “A”. Aparentemente lo efímero de la apertura floral reduce la pérdida de agua por transpiración, y protege el estigma que es de tipo húmedo, y

promueve la germinación de los granos de polen (Rosas, 1984). En algunos casos la dehiscencia de anteras se presenta previamente a la apertura, fenómeno conocido como *cleistogamia preantesis* que promueve la autopolinización (Rosas, 1984; Rosas y Pimienta, 1986).

La inducción floral en nopal y cactáceas en general es un proceso poco estudiado; sólo se ha señalado que ocurre cuando las temperaturas son relativamente bajas (Inglese *et al.* 2002; Pimienta y del Castillo, 2002).

Los objetivos del trabajo fueron caracterizar los momentos de emergencia de yemas reproductivas, de antesis y de maduración del fruto, así como determinar los requerimientos térmicos de las dos últimas etapas, y describir el comportamiento de la apertura y cierre floral en *Opuntia ficus-índica* cv. CP-Azteca

## 1.2 MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización del experimento

Este trabajo se efectuó en los años 2001, 2002, 2003, 2005, 2006 y 2007 en Tepetlaoxtoc, Estado de México, localizado a 2250 msnm, 19°35' de latitud norte y 98°47' de longitud oeste. El clima del sitio es semiseco templado con lluvias en verano (precipitación media anual de 623 mm) y escasas el resto del año, con precipitación invernal de 5 a 10 %. La temperatura promedio anual es 14.9 °C, y los vientos dominantes son del noroeste durante el invierno, y del noreste en la estación cálido-húmeda, con velocidad media de 3 a 10 km h<sup>-1</sup>. Ocurren heladas de septiembre a marzo, con una frecuencia variable de 10 a 100 días, con predominio de la frecuencia de 40 a 60 días al año (García, 1978).

### Material vegetativo

La experimentación se hizo en los años 2001, 2002, 2003, 2005, 2006 y 2007 en plantas de nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill cv. CP-Azteca de frutos rojos, de cuatro años de edad plantados a una densidad de 0.0625 plantas m<sup>-2</sup>, en un terreno con pendiente de 0.5 %. En el estudio de la apertura y cierre floral se incluyeron plantas de *O. amyclaea*, *O. robusta* y *O. streptacantha* de la misma edad, de modo que se compararon cuatro especies.

## Tratamientos

La temperatura del aire y la precipitación de los años 2001 y 2002, se registraron con un termómetro de máximas y mínimas y con un pluviómetro; en 2006 y 2007 se registraron con una estación meteorológica automática (Dynamax® SL100397) que también registró la radiación global.

Para estimar la precipitación y la temperatura de los años 2000, 2004, y 2005 se usó el programa de redes neuronales de la Ward System Group, Inc. alimentado con información de 2006 y 2007 colectada por la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados en Montecillo, Texcoco, Estado de México, y de la estación meteorológica Dynamax instalada en Tepetlaoxtoc.

Se registraron las fechas de aparición de yemas reproductivas (cuando tenían de 2 a 5 mm de diámetro), de antesis y de madurez del fruto (80 % de coloración en el pericarpio). Para lo anterior se seleccionaron 50 yemas florales en condiciones de riego y de temporal en cinco fechas estudiadas.

Para la condición de riego se instaló entre las líneas de plantación un sistema con aspersores cada 5 m con un radio de riego de 2.5 m y un gasto de 46.5 L h<sup>-1</sup>. La programación y volumen de los riegos fue la necesaria para conseguir una lámina de agua (LC) capaz de mantener a capacidad de campo (CC) el suelo, de acuerdo con las propiedades físicas (Cuadro 1.1) consideradas en la siguiente ecuación (Torres, 1995):

$$LC = [(CC-PMP)/100] (DA) (PR)$$

LC = lámina de agua calculada (cm); CC = capacidad de campo (%); PMP = punto de marchitamiento permanente (%); DA=densidad aparente (g cm<sup>-3</sup>); PR = profundidad de la raíz.

La condición de temporal sólo tuvo el aporte del agua de lluvia.

Cuadro 1.1. Valores de las principales propiedades físicas del suelo.

Propiedad	Valor
Capacidad de campo (CC)	22.85 %
Punto de marchitamiento permanente (PMP)	16.70 %
Capacidad de intercambio cationico (CIC)	21.40 meq/100 g
Conductividad eléctrica (CE)	0.60 dS m <sup>-1</sup>
Densidad aparente (DA)	1.26 g cm <sup>-3</sup>
Textura	franco-arenosa

Con los datos de temperatura se calcularon los grados día de desarrollo (GDD) acumulados en el período de emergencia o brotación de la yema floral a antesis, y de antesis a madurez de fruto; también se determinó la acumulación total de GDD de

emergencia a madurez. En virtud de que no se encontraron antecedentes del uso de un método para determinar los requerimientos térmicos de las etapas fenológicas del nopal, se utilizó el siguiente método residual:

$$\text{GDD} = \sum_{i=1}^n X - T_b, \text{ donde:}$$

GDD = grados día de desarrollo acumulados desde el día  $i$  hasta el  $n$ ;

$X$  = temperatura media diaria (TM, °C);

$T_b$  = temperatura base.

La temperatura base que se utilizó fue 0 °C, por considerar que esta temperatura se presenta con frecuencia en el periodo septiembre-marzo, en la cual se detiene el crecimiento vegetativo del nopal pero ocurre la inducción floral y diferenciación de las yemas florales (Inglese *et al.* 2002; Pimienta y del Castillo, 2002).

El efecto de la humedad del suelo en la apertura floral se registró solamente en *Opuntia ficus-indica*, en 20 plantas de riego y en 20 de temporal. En cambio, en *O. amyclaea*, *O. robusta* y *O. streptacantha* sólo se monitorearon 20 plantas en condiciones de temporal. En todos los casos se dio seguimiento al desarrollo de las yemas florales hasta la apertura floral, mediante el registro del horario de inicio de apertura, y en las flores se dio seguimiento a la hora de apertura, apertura máxima y de cierre, y los días que permanecen abiertas.

Para estudiar el efecto de la humedad relativa en la duración y periodos de apertura floral, se seleccionaron 30 yemas florales en plantas con riego y 30 en plantas de temporal, a punto de abrir. Diez de ellas se cubrieron con una bolsa de plástico que contenía una servilleta humedecida con 100 mL de agua destilada para propiciar alta humedad relativa; a otras 10 yemas sólo se les colocó la bolsa de plástico; y 10 yemas fueron los testigos sin bolsa. La disminución en la RFA que se registró dentro de la bolsa fue 4.8 %, en promedio.

Para estudiar el efecto de la polinización del estigma en los días de apertura floral, se seleccionaron 30 flores en plantas con riego y 30 de temporal. A 10 flores se les cortó el estigma al inicio de la apertura floral, a otras 10 se les cortó al medio día y 10 flores fueron los testigos sin poda de estigma.

#### Técnicas estadísticas de análisis

Para el análisis de los resultados se empleó el paquete SAS-V9.1-2003 (The SAS System for Windows V9.1, SAS Institute 2003), con el cual se hizo el análisis de

varianza, y cuando las prueba de F para tratamientos resultaron significativas se hicieron comparaciones de medias mediante la prueba de Tukey, con  $\alpha = 0.05$ .

### 1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las yemas florales aparecieron de enero a mayo, la antesis se presentó de abril a junio y la madurez de los frutos ocurrió de mediados de julio hasta octubre. La duración requerida para que las yemas florales de CP-Azteca llegaran a antesis y a madurez de fruto fue variable entre fechas de aparición, el período se acortó conforme las yemas emergían más tarde, y fueron más variables los días a antesis que los días de antesis a madurez del fruto. En contraste, los GDD acumulados en ambos casos fue menos heterogéneo (Cuadro 1.2). Al comparar la fecha más temprana (16 de febrero) con la más tardía (1 de abril), se detectó que las yemas que emergieron (E) temprano requirieron 68 días (d) para llegar a antesis (A), 104 d de A a madurez (M) del fruto y un total de 172 d para E-M; los correspondientes GDD fueron 1126, 1492 y 2618. Las yemas que emergieron el 1 de abril requirieron 42 d para E-A, 110 d para A-M y 152 d para E-M; los correspondientes GDD fueron 1129, 1484, y 2613. En promedio, la variedad CP-Azteca de nopal requirió 51 d para E-A, 109 d para A-M, y 160 d para E-M; y los GDD fueron 1132, 1489 y 2622, respectivamente.

Cuadro 1.2. Días y GDD de emergencia de yema (E) a antesis (A) y madurez de fruto (M) en *O. ficus-indica* cv. CP-Azteca.

Fecha E	Días E-A	GDD E-A	Días A-M	GDD A-M	Días E-M	GDD E-M
16 febrero	68	1126	104	1492	172	2618
8 marzo	54	1138	111	1493	165	2631
17 marzo	47	1131	109	1491	157	2622
28 mar	44	1137	110	1488	154	2625
1 abril	42	1129	110	1483	152	2612
Media	51	1132	109	1489	160	2621
D. Est.	10.5	5.2	2.7	3.7	8.4	6.9
C.V. (%)	20.55	0.46	2.48	0.25	5.25	0.26

Según de la Rosa y Santamaría (1998) la duración de emergencia de yema floral a antesis en *O. amyclaea* es de 55 d, y similarmente Pimienta (1990) señala que se requieren de 50 a 60 d. Respecto los requerimientos térmicos, *O. ficus-indica* cv. Gialla requiere 40 mil grados hora de floración a madurez comercial en Sicilia (Inglese *et al.* 2002); en la misma variedad Aounallah *et al.* (2009) encontraron, que las yemas tardías necesitaron de 15 a 40 % menos grados hora que las tempranas, en 5 de 6 estados fenológicos comprendidos desde iniciación floral hasta caída del perianto. Sin embargo,

el método de Aounallah *et al.* (2009) implicó el uso de tres temperaturas cardinales: una temperatura base de 5 °C, una óptima de 25 °C y una crítica de 35 °C de modo que los requerimientos diferentes entre yemas tempranas y tardías indican que su método fue apropiado ya que, idealmente, dentro de los límites de la temperatura base y la óptima los requerimientos térmicos deberían tender a ser una constante en diferentes ambientes (Hodges, 1991).

En este estudio el desarrollo de las yemas florales de fechas tempranas y tardías requirieron los mismos GDD para antesis y este número fue menor que de floración a madurez, siendo también semejante en las diferentes fechas (Cuadro 1.2). En consecuencia, el periodo de floración de las yemas que emergieron en las diferentes fechas, con una diferencia máxima de 45 días, se restringió a un corto período de maduración de 30 días (de la segunda quincena de abril a la primera de mayo). Esto explica, en parte, los resultados de Zegbe y Covarrubias (2008a) obtenidos en los cultivares “Cristalina” y “Rojo liso” de nopal y en los cuales eliminaron las yemas reproductivas más desarrolladas (una semana antes de antesis) para retrasar la cosecha, eliminaron las menos desarrolladas para adelantarla, sin obtener el efecto esperado. Ello posiblemente se deba a que las yemas jóvenes se desarrollaron en un ambiente con mayores temperaturas que resultó en una acumulación de los GDD requeridos para presentar la antesis en menos tiempo que el de las yemas emergidas en fechas tempranas y que correspondieron al tratamiento de adelanto de cosecha, de modo que el tiempo de cosecha entre los dos tratamientos no fue tan diferente.

Las flores abrieron 1, 2 ó 3 d (Figuras 1.1 y 1.2) variación que se atribuyó a diferencias en la cantidad de agua acumulada en los cladodios como consecuencia de las diferentes cantidades de lluvia registradas en el año inmediato anterior (Cuadro 1.3). Así, en 2001 se registraron aperturas de 2 y 3 d porque la precipitación en 2000 fue la mayor del período 2000-2007. En 2002 y 2003 se registró solamente un día de apertura floral, lo que se asocia con las menores precipitaciones registradas en los años anteriores. En 2005, 2006 y 2007 la apertura floral fue de 2 d, salvo un porcentaje menor que sólo abrió 1 d (Cuadro 1.4); En estos tres años el inicio de la apertura floral ocurrió en promedio a las 10:00 h, para alcanzar la apertura máxima a las 11:18 h, el inicio del cierre ocurrió a las 17:30 h y el cierre total a las 19:00 h, y no se observó ninguna apertura mayor a 2 d.

Cuadro 1.3. Precipitación anual en Montecillo y Tepetlaoxtoc

Año	Precipitación anual en mm						
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Montecillo	689.4	440.0	449.6	588.6	569.4	514.1	583.0
Tepetlaoxtoc	787.9	538.5	548.1	687.1	667.9	623.2	670.8

Cuadro 1.4. Porcentaje de apertura para diferentes especies en 2005, 2006 y 2007

Especie	Condición	% de apertura floral					
		2005		2006		2007	
		1 día	2 días	1 día	2 días	1 día	2 días
<i>Opuntia ficus-indica</i>	Riego	16.7	83.3	13.3	86.7	14.3	85.7
<i>Opuntia ficus-indica</i>	Temporal	28.6	71.4	10.0	90.0	50.0	50.0
<i>Opuntia amyclaea</i>	Temporal	30.0	70.0	---	---	00.0	100.0
<i>Opuntia robusta</i>	Temporal	28.6	71.4	---	---	17.5	82.5
<i>Opuntia strephacantha</i>	Temporal	16.7	83.3	---	---	23.8	76.2

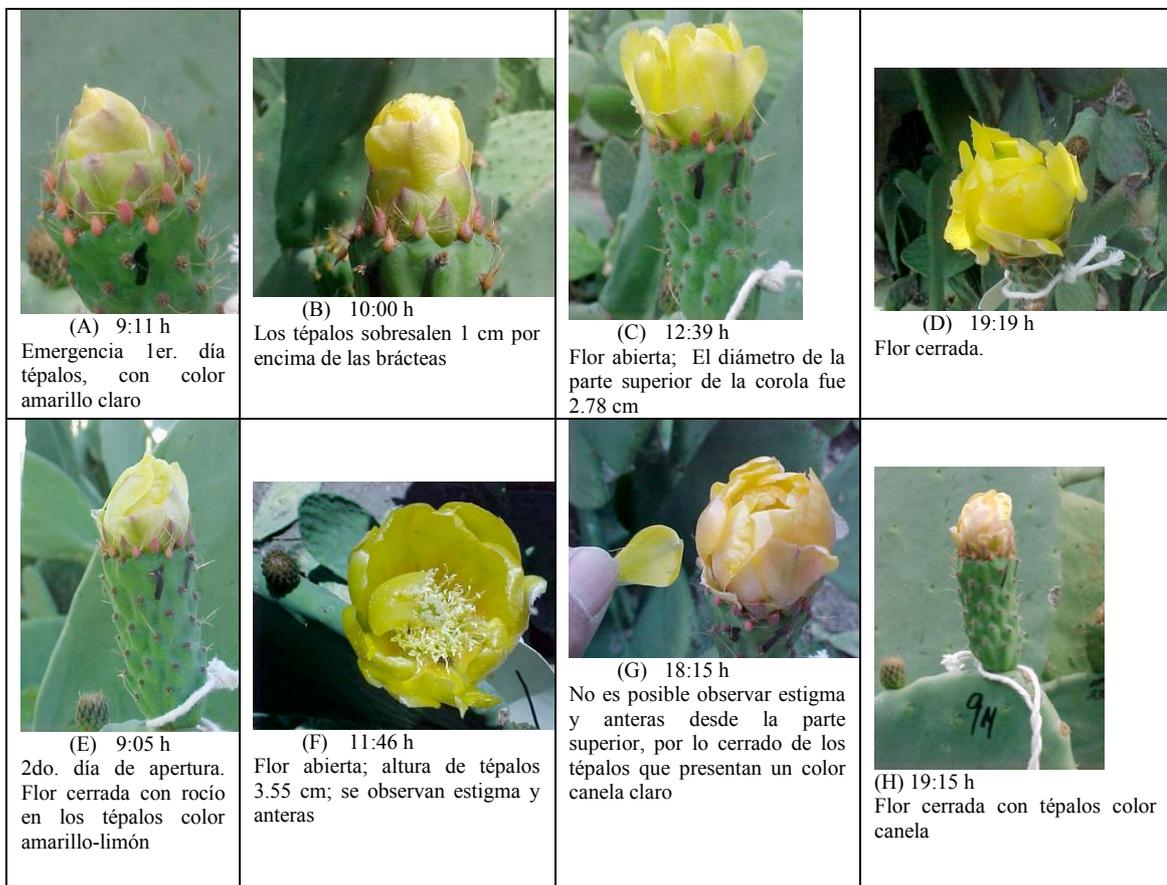


Figura 1.1. Seguimiento de la apertura floral con duración de dos días

En la Figura 1.1 se presenta gráficamente la dinámica de la apertura floral ocurrida en mayo del 2001 que duro 2 d. El primer día de apertura inició a 9:11 h, y continuó para alcanzar el diámetro máximo de apertura a las 15:21 h (4.2 cm), para luego cerrar a las 19:00 h. Los tépalos presentaron un color amarillo limón. En el segundo día la apertura inició a las 9:43 h y la máxima apertura a las 13:00 h, con un diámetro menor

al del primer día; el cierre terminó a las 19:15 h, pero no es completo y los tépalos presentaron un color canela.

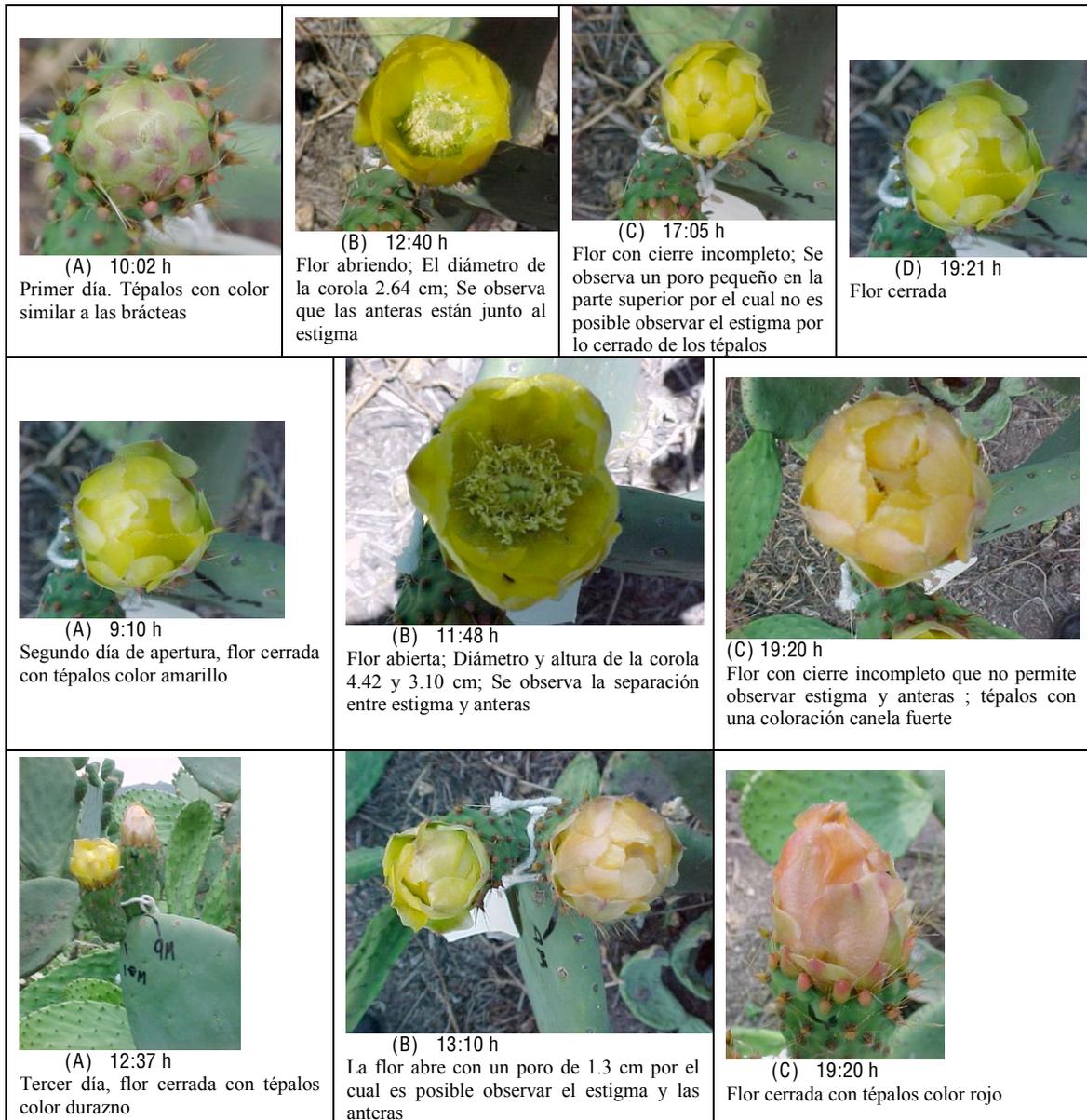


Figura 1.2. Seguimiento de la apertura floral con duración de tres días, mayo del 2001

La dinámica de cierre y apertura floral con duración de 3 d se muestra en la Figura 1.2. El primer día la apertura inició a las 12:40 h, el diámetro mayor de apertura ocurrió a las 13:40 h, y la flor cerró a las 19:21 h. El segundo día la apertura inició a las 9:48 h, el diámetro mayor de apertura ocurrió a las 11:48 h y la flor cerró a las 19:20 h. El tercer día la flor abrió a las 13:10 h y cerró a las 19:20 h. Se observó que la capacidad de apertura y cierre disminuye con los días y además la coloración de los tépalos se hace oscura. Se demuestra también que la apertura floral de *Opuntia ficus-indica* cv. CP-Azteca, en las condiciones utilizadas, fue diferente a la descrita previamente por

Pimienta (1990), posiblemente porque él evaluó genotipos diferentes (formas y variedades silvestres y cultivadas que se desarrollan en los estados de Zacatecas, San Luís Potosí, Guanajuato y Jalisco) en condiciones edáfico-climáticas distintas.

No se apreciaron diferencias significativas entre riego y temporal en los días de apertura floral y horario de apertura y cierre, lo cual puede deberse al almacenamiento de agua que hacen los tallos suculentos, importante adaptación a los ambientes áridos y semiáridos donde una vez que las flores se forman la reproducción toma prioridad sobre el mantenimiento del tejido vegetativo (Pimienta-Barrios y del Castillo, 2002).

En todos los niveles de humedad que hubo a través de tratamientos y años la apertura floral duró 1 a 3 d, por lo cual se puede inferir que la humedad relativa no jugó un papel importante en la apertura floral. En algunas especies la apertura floral no reacciona a cambios en la humedad relativa (Ichimura y Suto, 1998) mientras que en otras una humedad relativa alta acelera la apertura. Todas las especies en las cuales la apertura es afectada por la humedad relativa alta, la floración es nocturna, solamente si la flor abre por la tarde o en la noche, la humedad relativa puede estimular la apertura o puede tener un papel biológico. Al parecer, la apertura floral con una disminución de la humedad relativa indica que la apertura matutina es generalmente independiente de ésta (van Doorn y van Meeteren, 2003).

La influencia de la polinización del estigma en los días de apertura floral, mostraron que en los tres niveles las flores de las cuatro especies abren sólo una vez, aún cuando no haya polinización. Se puede afirmar que la polinización no juega un papel importante en este proceso.

La apertura floral en especies suculentas parece ser independiente de la regulación externa pues ocurre a diferentes horas del día, en contraste con la apertura floral en otras especies que están relacionados con la hora del día. El cierre de la flor puede ser independiente de la hora del día, lo cual indica que dicho cierre esté regulado por señales externas como temperatura y luz, por un ritmo interno y por el contenido de humedad de los cladodios. La apertura matutina parece estar correlaciona con un aumento en la temperatura y el nivel de radiación solar, contrario al caso de especies que abren por la tarde o en la noche cuyo movimiento se correlaciona con la disminución de la temperatura y radiación, y con un aumento en humedad relativa.

La temperatura y la luz posiblemente afecten la apertura de *Opuntia ficus-indica* var. Azteca-CP como ocurre en otras especies (Ichimura y Suto, 1998). En experimentos de

floración, la temperatura debe ser rigurosamente controlada ya que la luz puede aumentar su temperatura (McKee y Richards, 1998). La apertura de flores que abren en primavera, como en *Opuntia ficus-indica* cv. CP-Azteca, parece depender de la temperatura al igual que en otras especies (van Doorn and van Meeteren, 2003).

En la mayoría de las especies el cierre floral responde a factores externos de una manera similar a la apertura. En *Opuntia ficus-indica* var. Azteca-CP, sin embargo, el cierre parecer deberse a un ritmo endógeno. Otras especies cierran por senectud floral (van Doorn y van Meeteren, 2003), como también es posible que también ocurra en ésta. Es posible que en *Opuntia ficus-indica* cv. CP-Azteca sea requisito indispensable un período mínimo de oscuridad para la apertura floral diurna, y si un período mínimo de la luz es necesario para que ocurra el cierre vespertino, en cuyo caso la influencia de fitocromos y de un ritmo endógeno en donde los tépalos podrían considerarse como los sitios de foto recepción, como ocurre en otras especies (Kaihara y Takimoto, 1980, 1981a, b).

La presencia de un ritmo endógeno de apertura y cierre floral ha sido demostrada generalmente mediante la colocación de botones florales en luz u oscuridad constantes. En todas las especies investigadas el ritmo existe y continúa por un tiempo bajo luz constante u oscuridad, pero también puede ser afectado por cambios de luz a oscuridad o viceversa (van Doorn y van Meeteren, 2003). Los ritmos circadianos en la apertura y cierre floral son así altamente dependientes a cambios de luz a oscuridad (o viceversa). La temperatura puede ser también el estímulo, como ocurre en varias especies (Hayama y Coupland, 2003).

Desde un punto de vista ecológico y evolutivo, no es claro por qué en algunas especies las flores permanecen abiertas hasta su caída (Ashman y Schoen, 1994; van Doorn, 1997), ni es obvio el por qué otras abren y cierran. La apertura y el cierre floral muestran una amplia gama de estrategias. Probablemente éstas se han seleccionado para optimizar el éxito reproductivo con un costo metabólico mínimo. En *Opuntia ficus-indica* var. Azteca-CP, el comportamiento de apertura y cierre floral se atribuye a las condiciones semiáridas en donde comúnmente se desarrollan las plantas, pero el comportamiento no es homogéneo. Las flores se presentan en una extensa gama de situaciones ecológicas, no es sorprendente detectar que diversos factores ambientales regulan la apertura y cierre, pero éstos no se han categorizado a sus nichos ecológicos, ni se han explicado en términos de ventajas selectivas (van Doorn y van Meeteren,

2003). La ventaja del cierre floral regular no es clara, hasta ahora se han propuesto algunas hipótesis pero no se han probado. El cierre floral por ejemplo, puede reducir la pérdida de agua y restringir la entrada de microorganismos potencialmente dañinos. Las bacterias y los hongos generalmente no crecen en los tejidos finos de pétalos y tépalos secos, pero la presencia del agua (como el rocío) en las anteras y el estigma de las flores, o la alta humedad ambiental, apresura el crecimiento de hongos y bacterias.

#### 1.4 CONCLUSIONES

Los días requeridos para el desarrollo de la yema floral a la antesis en *Opuntia ficus-indica* son mayores en yemas tempranas, y se van reduciendo conforme la fecha de emergencia de la yema floral es más tardía.

No obstante, las duraciones expresadas en grados día acumulados fueron iguales en todas las fechas de emergencia de yemas, lo que demuestra que el método aquí usado para calcular los GDD es correcto por su consistencia.

Los días en que ocurre la apertura floral es variable en las cuatro especies estudiadas (*Opuntia ficus-indica*, *O. amyclaea*, *O. robusta* y *O. streptacantha*)

La humedad relativa del aire no influye en el número de días de apertura floral

La cinética de la apertura floral indica una relativa independencia en la disponibilidad del agua del suelo y de la polinización.

#### 1.5 LITERATURA CITADA

- Aounallah, M K, A Sahli, H Mehri, T Bettaib, A Jebari, T Tissaoui, H Ben Salem (2009) Flower development and heat requirement of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (mill.) l.) cv. gialla growing under tunisian conditions. Acta Hort. (ISHS) 811:275-280
- Ashman T L, D J Schoen (1994) How long should flowers live? Nature 371:788-791.
- Chapman B, J J Mondragón, R A Bunch, A H Paterson (2002) Breeding and biotechnology. *In*: Cacti Biology and Uses. P S Nobel (ed). University of California Press. USA. pp. 255-271.
- De la Rosa H, D Santamaría (1998) El Nopal: Usos, Manejo Agronómico y Costos de Producción en México. CONAZA-UACH-CIESTAAM, México. 226 p.
- García E (1978) Los climas del valle de México. Colegio de Postgraduados S.A.R.H. Chapingo, México. 63 pp.

- Hayama R, G Coupland (2003) Shedding light on the circadian clock and the photoperiodic control of Flowering. *Current Opinion in Plant Biology* 6:13-19.
- Hodges, T (1991) Temperature and water stress effects on phenology. *In*: Hodges, T (ed.). *Predicting crop phenology*. CRC Press, Inc. USA.
- Ichimura K, K Suto (1998) Environmental factors controlling flower opening and closing in a *Portulaca* hybrid. *Annals of Botany* 82:67-70.
- Inglese P, F Basile, M Schirra (2002) Cactus pear fruit production. *In*: Nobel P S (ed.). *Cacti Biology and Uses*. University of California Press, USA. Pp. 163-183.
- Kaihara S, A Takimoto (1980) Studies on the light controlling the time of flower-opening in *Pharbitis nil*. *Plant and Cell Physiology* 21:21-26.
- Kaihara S, A Takimoto (1981a) Effects of light and temperature on flower-opening in *Pharbitis nil*. *Plant and Cell Physiology* 22:215-221.
- Kaihara S, A Takimoto (1981b) Physical basis of flower opening in *Pharbitis nil*. *Plant and Cell Physiology* 22:307-310.
- McKee J, A J Richards (1998) Effect of flower structure and flower colour on intrafloral warming, pollen germination and pollen tube growth in winter-flowering *Crocus* L. (Iridaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society* 128:369-384.
- Nerd A, y Mizrahi (1997) Reproductive biology of cacti. *Horticultural Review* 18:321-346
- Ochoa M J, M G Targa, G Abdala, G Leguizamón (2009) Extending fruiting season of cactus pear (*Opuntia ficus-índica* (L.) miller) in Santiago del estero, Argentina. *Acta Hort. (ISHS)* 811:87-90
- Phillips H L, H Kende (1980) Structural changes in flowers of *Ipomoea tricolor* during flower opening and closing. *Protoplasma* 102:199-216.
- Pimienta B E (1990) *El nopal tunero*. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México. 246 p.
- Pimienta-Barrios E, R F del Castillo (2002) Reproductive Biology. *In*: Cacti Biology and Uses. P S Nobel (ed). University of California Press. USA. pp. 75-90.
- Rosas C M P (1984) Polinización y fase progámica en *Opuntia spp.* Tesis Profesional. Universidad Michoacana de San Nicolás del Hidalgo, Morelia, Michoacán.
- Rosas C M P, E B Pimienta (1986) Polinización y fase progámica en nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) tunero. *Fitotecnia*: 164-176.

- SAS Institute (2003) Statistical Analysis System, Software version 9.1, SAS Institute, Cary, NC USA.
- Schrempf M (1977) Studies on the circadian rhythm of petal movement in *Kalanchoë blossfeldiana*. Journal of Interdisciplinary Cycle Research 8:396-400.
- Schrempf M (1980) The action of abscisic acid on the circadian petal movement of *Kalanchoë blossfeldiana*. Zeitschrift für Pflanzenphysiologie 100:397-407.
- SIAP (2007) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Anuario Estadístico de la Producción Agrícola <http://www.siap.gob.mx/>. (19 de Septiembre de 2007)
- Tanaka O, H Wada, T Yokoyama, H Murakami (1987) Environmental factors controlling capitulum opening and closing of dandelion, *Taraxacum albidum*. Plant and Cell Physiology 28:727-730.
- Torres R E (1995) Agrometeorología. Ed. Trillas. México. 154p.
- van Doorn W G (1997) Effects of pollination on floral attraction and longevity. Journal of Experimental Botany 48:1615-1622.
- van Doorn W G, van Meeteren U (2003) Flower opening and closure: a review. Journal of Experimental Botany 54:1801-1812.
- Warrington I J, E T Kanemasu (1983) Growth responses to temperature and photoperiod. I: Seedling emergence, tassel initiation and anthesis. Agronomy Journal 75: 749-754.
- Zegbe J A, J Mena-Covarrubias (2008a) ¿Remover las yemas reproductivas afecta la época de cosecha del nopal tunero? Revista Fitotecnia Mexicana 31(3), pp. 49-52.
- Zegbe, J A, J Mena-Covarrubias (2008b) Retraso de la cosecha en nopal tunero cv. Cristalina. Revista Chapingo Serie Horticultura 14(1): 85-90.

CAPÍTULO II  
CALIDAD DE FRUTOS CON Y SIN SEMILLA EN *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill  
CV. CP-AZTECA

RESUMEN

El fruto del nopal tunero tiene demanda en el mercado nacional e internacional, pero presenta una característica que no permite el incremento de su comercialización, es la presencia de semillas en la pulpa y espinas en la cáscara. El objetivo del presente trabajo fue determinar si la calidad de los frutos sin semilla es superior a la de frutos normales. Este trabajo se efectuó en el 2006 en Tepetlaoxtoc, Estado de México, localizado a 2250 msnm, 19°35' de latitud norte y 98°47' de longitud oeste, con plantas de nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill cv. CP-Azteca de frutos rojos, de nueve años de edad. Se estudiaron dos tratamientos, frutos con inducción de partenocarpia y frutos normales; la unidad experimental estuvo constituida de dos plantas y el número de repeticiones fueron diez. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar. Los frutos con inducción de partenocarpia resultaron 100 % sin semilla; sus dimensiones, peso y contenido de fibra fueron significativamente menores que en el fruto normal, pero su densidad y relación cáscara/pulpa fue mayor. Los frutos partenocárpico resultaron 100% sin semilla, y las características de la pulpa en relación a sólidos solubles totales, acidez titulable, contenido de azúcares totales y reductores, ácido ascórbico y contenido calórico son similares a la del fruto con semilla y que la cáscara tiene propiedades que la hacen comestible, se concluye que su calidad es superior y que esto compensa la reducción del peso del fruto partenocárpico.

Palabras clave: *Opuntia ficus-indica*, fruto partenocárpico, calidad de fruto, contenido calórico, lóculo, pericarpio.

## 2.1 INTRODUCCIÓN

México es uno de los países con mayor producción de tuna (SIAP, 2007; Inglese *et al.*, 2002) y donde cuenta con la mayor diversidad genética del género *Opuntia* (Flores y Gallegos, 1993) y la mayor producción de tuna (SIAP, 2007; Inglese *et al.*, 2002). La tuna es una baya polispérmica con un número relativamente alto de semillas que varía de 213 a 361 en las variedades más utilizadas en el país. Tiene dos tipos de semilla, las normales y las abortivas; las segundas son de menor tamaño pero siguen siendo desagradables al paladar por su dureza. Las espinas (“ahuates”) de la cáscara (pericarpio) se pueden eliminar física o químicamente, aunque ello afecta negativamente la vida de anaquel (López, 2006). Existe correlación entre el número de semillas y el tamaño y forma final del fruto, ya que la semilla con embrión es de mayor tamaño y produce mayor cantidad de hormonas y pulpa (Gil *et al.*, 1977; Barbera *et al.* 1994). Se considera que para mejorar la calidad del fruto, sería deseable que, como en otras especies, hubiera tunas sin semillas.

Los frutos sin semilla, partenocárpicos, son altamente apreciados por los consumidores y obtienen mejores precios. Se pueden obtener en genotipos particulares de algunas especies en forma natural o mediante la partenocarpia artificial. La partenocarpia es el desarrollo de un fruto sin la fertilización de los óvulos; se considera estimulativa cuando el estímulo de la polinización promueve la formación del fruto y vegetativa cuando no es necesario dicho estímulo. Puede tener un origen genético (Simmonds, 1953), ambiental, por acción de microorganismos (Rademacher, 1994) o inducida por aplicación de varios productos (Bangerth y Schröder, 1994).

En algunos cultivares de especies como cerezo, uva, durazno con fruto de rápido crecimiento, es posible observar frutos bien desarrollados aunque el embrión muera en la primera o segunda etapas del crecimiento; en este caso no se consideran como frutos partenocárpicos (Ryugo, 1988).

Con la aplicación de ácido giberélico se ha podido producir frutos partenocárpicos en diferentes especies frutales de hueso y pepita (Bukovak, 1963; Crane *et al.*, 1960; Crane, 1963; Dennis y Edgerton, 1962), mediante dosis aplicadas en diferentes etapas del desarrollo floral y del fruto (botones florales, flor abierta, caída de pétalos o frutos en crecimiento), aunque las especies y genotipos dentro de especies no responden de la misma forma a un tratamiento determinado y que algunas no responden a ninguno.

En los frutos partenocárpicos se ha observado que los óvulos jóvenes están presentes y son cruciales en su desarrollo. Aunque las variedades sin semilla generalmente tienen un nivel inferior de auxinas y giberelinas que las que contienen las variedades con semillas, se supone que los óvulos influyen al suministrar las sustancias de crecimiento en el momento crítico de la floración.

La acción directa de la semilla en el cuajado y crecimiento del fruto se ha demostrado en diversas especies, así como su efecto en la diferenciación floral. Chan y Caín (1967) demostraron que la presencia de semillas en manzano inhibe la formación de yemas florales de la próxima temporada y así induce alternancia en la producción.

La partenocarpia vegetativa (amarre del fruto sin polinización) se ejemplifica en pera cv. Bartlett, higo cv. Misión (Ryugo, 1988) y en nopal tunero clon BS1, mutante de *O. ficus-indica*. La partenocarpia estimulativa con polinización pero sin fertilización se observa en la naranja cv. Washington Navel, porque presenta incompatibilidad; en plátanos comestibles diploides la partenocarpia está determinada por una serie de genes dominantes complementarios (Simmonds, 1953).

En especies partenocárpicas, los niveles relativamente más altos de reguladores del crecimiento en la flor comparado a las no partenocárpicas, son los que permiten el amarre y el crecimiento del fruto (Ryugo, 1988). En níspero (*Eriobotrya japonica* Lindl) las aplicaciones de 200 ppm ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de ácido giberélico después de la emergencia de las yemas florales o de 20 ppm de ácido naftalen acético en plena floración inducen la formación de frutos sin semilla más pequeños que los normales, y con 4 o 5 semanas de maduración más rápida, lo que sugirió tratamientos subsecuentes para incrementar el tamaño, como asperjar los racimos con 250-300 ppm de  $\text{AG}_3$  después de la emergencia de los botones florales que incrementó la pulpa; con una segunda aplicación de  $\text{AG}_3$  y de bencil adenina se incrementó el contenido de sólidos solubles totales; la aspersion de racimos con una solución de 500 ppm de  $\text{AG}_3$  o 500 ppm de  $\text{AG}_3$  + 20 ppm de cinetina estimuló el crecimiento en tamaño en frutos sin semillas de modo que lograron tener un tamaño similar al de frutos con semilla (Baugerth y Schröder, 1994).

El género *Opuntia*, originario de América como el resto de cactáceas, es uno de los más diversos genéticamente y sus más de 160 especies están distribuidas desde el sur de Canadá a la Patagonia, en ambientes muy diversos. Dicho género presenta una amplia variación morfológica inter e intraespecífica que se atribuye en parte al flujo genético

ínter específico que da lugar a la formación de híbridos y a la formación de poliploides. El número básico de cromosomas en *Opuntia* es de  $n=11$  y en las especies colectadas en México se han encontrado niveles de ploidía de  $2n$ ,  $4n$ ,  $6n$  y  $8n$ . Los nopales tuneros silvestres son considerados diploides y tetraploides, y los cultivados tienen el grado más alto de poliploidía ( $2n=8$ ). Después de la llegada de los españoles a América el nopal se dispersó a otros países como Italia, España, Marruecos, Túnez, Egipto, Chile, Argentina, Brasil, Sudáfrica e Israel, entre otros. Sus frutos, conocidos en México como tunas, son comestibles, así como los cladodios tiernos (nopalitos) que se consumen como verdura; los frutos y tallos tiernos y maduros también pueden servir de forraje al ganado. Otro uso es el medicinal (Inglese *et al.*, 2002).

El fruto del nopal tunero es una baya unilocular, polispérmica y carnosa, que se origina de una flor con ovario ínfero, con óvulos dispuestos en una placentación parietal y cuyo lóculo está circundado por un tejido que corresponde al pericarpelo y que se considera el receptáculo (cáscara), que tiene tejidos anatómicamente similares a los cladodios, por lo que se le considera un tallo modificado (Pimienta y Engleman, 1985). El principal uso del fruto en México es para consumo humano en fresco, aunque el resto de la planta también puede servir como forraje y puede producir nopalitos.

La investigación para inducir artificialmente la partenocarpia en *Opuntia* se inició hace unos 50 años. Los frutos de *Opuntia ficus-indica* son apreciados por su sabor agradable pero tienen como principal objeción la gran cantidad de semillas en la pulpa, por lo que se ha intentado obtener frutos partenocárpicos mediante aplicación de diferentes dosis de ácido naftalen acético ( $20$ ,  $30$ ,  $80$  y  $100$   $\text{mg L}^{-1}$ ) sin tomar medidas para evitar la polinización normal; los autores encontraron que ninguno de los tratamientos tuvo efecto sobre la formación de semillas. Veinte años después, en Chile, Gil *et al.*, (1977) seleccionaron botones florales cerrados 15 días antes de la antesis y aplicaron los siguientes tratamientos: la mitad de ellos se emasculó para eliminar el estigma y las anteras con tijera, y la otra mitad no se emasculó y se dejaron las flores para que se polinizaran libremente; a ambos tratamientos, excepto los controles, se aplicó ácido giberélico ( $\text{AG}_3$ ) en dosis de  $50$  y  $100$  ppm, por una, dos y tres veces, con objeto adicional de incrementar el tamaño de los frutos. La primera aplicación de cada concentración de  $\text{AG}_3$  se hizo en antesis, la segunda a  $35$  d y la tercera a  $70$  d después de antesis. Sus resultados demostraron que al eliminar el estigma y aplicar  $\text{AG}_3$  era posible obtener frutos sin semilla (partenocárpicos), pero con poca pulpa. Los autores

subrayan que si bien los frutos fueron partenocárpicos por carecer de embrión y de endospermo, los integumentos ovulares permanecieron endurecidos, que causan molestia al paladar de algunos consumidores. Las aplicaciones repetidas de AG<sub>3</sub> redujeron la concentración de sólidos solubles totales en la pulpa (endocarpio).

Díaz y Gil (1978) evaluaron dosis y métodos de aplicación en la inducción de partenocarpia y en el crecimiento del fruto en *O. ficus-índica*. En un primer experimento evaluaron el efecto del AG<sub>3</sub> en flores emasculadas, en las que con tijeras se cortaron los tépalos, estambres y estigma 15 días antes de la antesis; lograron obtener frutos partenocárpicos de tamaño similar a los frutos normales con semilla al asperjar manualmente 500 ppm de ácido giberélico en antesis o con tres aplicaciones de 100 ppm en antesis, 22 y 42 días después de la antesis. En otro experimento, Díaz y Gil (1978) estudiaron métodos de aplicación del AG<sub>3</sub>, como aplicación con lanolina conteniendo 1% o inyectando al ovario 1 mL de solución con 50 ppm. Sin embargo, en ambos experimentos encontraron presencia de falsas semillas con integumentos endurecidos, bajo contenido de sólidos solubles, elongación del fruto y escasa formación de pulpa. Las aplicaciones de AG<sub>3</sub> en yemas no emasculadas en pre antesis o en aplicaciones posteriores a esta etapa, produjeron frutos con menor número de semillas pero más grandes. El AG<sub>3</sub> aplicado asperjado 42 días después de la antesis retrasó la degradación de la clorofila de la cáscara.

Debido a que con aplicaciones de AG<sub>3</sub> a la flor emasculada (en antesis) más dos a tres aplicaciones al fruto como aspersión o inyección, no se logró una buena cantidad de pulpa ni se evitaron las semillas falsas endurecidas, Gil y Espinosa (1980) insistieron en el uso de AG<sub>3</sub> (100 y 500 ppm) y además probaron una auxina (2, 4, 5-T o Fenoprop) (50, 100 y 500 ppm) aplicadas a flores emasculadas antes de la antesis (15 y 36 días) y más una dosis de AG<sub>3</sub> (250 o 500 ppm) asperjada a los 5 y 43 días después de antesis para sostener el crecimiento del fruto. Estos autores concluyen que es posible producir frutos partenocárpicos normales en tamaño mediante una aspersión con 100 o 500 ppm de AG<sub>3</sub> o de 50 a 500 ppm de Fenoprop 15 días antes de la antesis, a flores inmaduras emasculadas y dos aspersiones de AG<sub>3</sub> después de la antesis, aunque el problema de las falsas semillas endurecidas continuó presentándose.

En el clon BS1 con partenocarpia vegetativa, un mutante natural de *Opuntia ficus-indica* cuyo fruto presenta semillas degeneradas y lignificadas, la polinización no es necesaria para el amarre y desarrollo del fruto.

Las investigaciones en México iniciaron en la década de los años 80, al evaluar AG<sub>3</sub> en dosis desde 20 a 150 ppm aplicadas desde la antesis hasta 90 días después de ésta, en *Opuntia amyclaea* T. cv. COPENA-5. Se logró así incrementar el tamaño del fruto pero se retrasó el período de cosecha y se registró un aumento de semillas abortivas o falsas y endurecidas. En otro estudio (Ortiz, 1988) se logró la obtención de frutos partenocárpicos de *O. amyclaea* cv. COPENA-5, mediante la aplicación de AG<sub>3</sub> a flores emasculadas; se obtuvieron frutos pequeños y con menor contenido de sólidos solubles totales, pero se alargó el período de cosecha.

Ortiz (1988) estudió el efecto simple y combinado de ácido giberélico (AG<sub>3</sub>) en dosis 300, 400 y 500 mg L<sup>-1</sup> y de las auxinas ácido naftalen acético (ANA) y ácido indol butírico (AIB) en dosis de 10, 20 y 50 mg L<sup>-1</sup> respectivamente, asperjadas a flores emasculadas e intactas de *O. amyclaea* cv. COPENA-5 en fechas de aplicación única o combinadas: 15 días antes de antesis, en antesis y 15, 30 y 45 días después de antesis; obtuvo frutos partenocárpicos con la aplicación de AG<sub>3</sub> a flores emasculadas 15 días antes de antesis, pero con el inconveniente de que los integumentos ovulares estaban lignificados y generaban molestias al consumidor.

En la patente No. 211431 Rodríguez y Cano (IMPI, 2002) reportan como invención un procedimiento para la obtención de frutos partenocárpicos en el género *Opuntia*, que consiste en: a) evitar la polinización a través de la eliminación del estigma, como lo hicieron Gil *et al.* (1977) y Díaz y Gil (1978), y que denominaron “astigmatomía”; b) la aplicación al día de corte, de giberelinas, citocininas, surfactantes y urea en la forma siguiente: La aplicación de 50-500 mg L<sup>-1</sup> de ácido giberélico (dosis reportadas por Díaz y Gil, 1978); > 0 < -10 mg L<sup>-1</sup> de L-1 de N-fenil-N<sup>1</sup>-1-2-3-tidiazol-5-11) urea (reportadas para otros frutos); 0.5 a 2 mL L<sup>-1</sup> de surfactante y 0.5 a 100 mg L<sup>-1</sup> de urea. Los autores de la patente recomiendan que la aplicación de esta solución se haga entre 0 y 35 días después de eliminar el estigma con un número de aplicaciones entre 1 y 3 por ciclo (procedimiento similar a lo antes reportado por Díaz y Gil, 1978 y por otros investigadores). Rodríguez y Cano (2002) indican que de esta forma se pueden obtener frutos partenocárpicos en el género *Opuntia*, aunque sólo presentan datos de tratamientos en 20 frutos.

Cabe señalar que en el género *Opuntia* existe gran diversidad genética, que incluye cilindropuntias y unas 160 especies adaptadas del sur de Canadá a la Patagonia. Tal vez por esto la tecnología de Rodríguez y Cano (2002), no ha dado los resultados esperados,

ya que el Ing. Roberto González, productor de tuna y principal exportador del país, encontró formación parcial de semillas y tamaño pequeño de fruto, además de que el es método es caro por las aplicaciones repetidas para incrementar el tamaño (Comunicación personal).

Pimienta (1990) postuló que no era posible producir tunas sin semilla al considerar que la pulpa se origina de la cubierta funicular de los óvulos; otros investigadores mencionan como única alternativa la selección de frutos con menos semillas normales y mayor número de semillas abortivas, y con la capacidad de formar pulpa (Inglese *et al.*, 2002; Chapman *et al.*, 2002).

No obstante varios investigadores mexicanos han demostrado que sí es posible y han obtenido logros importantes (López (2006) en la producción de la llamada Tuna Fresa Sin Semilla. Según Muratalla *et al.* (2002), en ocho años se desarrolló la tecnología para producir Tuna Fresa Sin Semilla (TFSS) mediante el producto CP-TFSS, cuya formulación es reservada por razones de patente. A las flores del cv. CP-Azteca seleccionada por sus frutos de pulpa color rojo-vino y por presentar frutos de calidad sin semilla. La calidad de la TFSS se caracteriza por rudimentos seminales blandos, imperceptibles al paladar, contenido de sólidos solubles totales similar en la cáscara y en la pulpa y, por tanto, con cáscara comestible, con una vida de anaquel de 4-6 semanas a 18-20 °C de temperatura del aire (López, 2006). López (2006) también encontró que en poscosecha la tasa respiratoria de los frutos fue estable (25-40 mL CO<sub>2</sub>/kg·h), siendo ligeramente menor en frutos sin semilla; en el día 65 poscosecha el 92% de estos frutos no presentaron pudriciones, mientras que este porcentaje en frutos con semillas fue de 40%, concluyendo que la partenocarpia inducida en el cv. CP-Azteca no afectó el patrón de crecimiento, que retrasó 7 días la madurez de consumo y que incrementó la vida de anaquel.

Según la “International Organization for Standardization”, calidad es “la totalidad de las características y rasgos de un producto relacionadas con su capacidad para satisfacer necesidades explícitas o implícitas.” Es decir, una buena calidad es cuando el producto cumple los requisitos especificados por el cliente, ya que calidad está definida por el consumidor, comprador, clasificador o cualquier otro tipo de cliente, sobre la base de una serie de mediciones subjetivas y objetivas del producto. Entre las mediciones pueden incluirse mediciones de pureza, sabor, color, madurez, seguridad, nutricionales, o cualquier otro atributo o característica del producto. De acuerdo con esta definición,

la calidad del fruto partenocárpico (sin semilla) del nopal *Opuntia ficus-indica* cv. CP-Azteca de frutos rojos, se puede definir por la presencia y cantidad de compuestos como pectinas, vitamina C, carbohidratos, ácido ascórbico, contenido calórico, fibra, etc., que determinan lo saludable y nutritivo, en comparación con el fruto normal o semilla (Cantwell, 1992; Grijspaardt-Vink, 1996; Muratalla *et al.*, 2002; Villarreal *et al.*, 1963), además de carecer de semillas duras.

En el fruto y los cladodios del nopal se encuentran compuestos orgánicos conocidos como pectinas, familia de sustancias que constituyen los elementos estructurales de la pared celular primaria y de las regiones intercelulares en las plantas superiores, donde funcionan como agentes hidratantes y consolidan el material celulósico de la pared celular (Aspinall, 1980). Las pectinas son producidas durante las etapas iniciales de crecimiento de la pared celular primaria y constituyen alrededor de un tercio de la biomasa de dicha pared celular (Fernández *et al.*, 1990). La mayor concentración de pectinas en la pared celular se encuentra en la lámina media, con disminución gradual hacia la membrana plasmática. Las pectinas ayudan a contener la presión de turgencia de la célula durante su crecimiento (Jarvis 1984).

Las pectinas son polisacáridos complejos heterogéneos en su estructura química y peso molecular, debido a variaciones en origen, condiciones de extracción, y otros factores ambientales (Chang *et al.*, 1994). El principal componente de las pectinas es el ácido galacturónico, el cual es interrumpido por la inserción de residuos de L-ramnosa adyacentes o en posiciones alternas (Aspinall, 1980). La concentración de ramnosa en pectinas suele ser de 1 a 4 %.

La presencia de pectinas en cladodios y frutos de diversas especies de *Opuntia* se ha documentado por casi tres décadas (Villarreal *et al.*, 1963). La concentración de pectina soluble fluctúa de 0.13 a 2.64 % en base húmeda y de 1.00 al 23.87 % con base en la materia seca, por lo cual los cladodios y frutos de *Opuntia spp.* pueden ser considerados como fuente comercial de pectinas. En nutrición la pectina se considera como un polisacárido soluble o fibra dietética, cuya ingesta reduce las lipoproteínas de baja densidad (LDL) en el plasma y los niveles de colesterol (Fernández *et al.*, 1990, 1994), ya que los efectos hipocolesterolémicos del nopal no se derivan de una reducción significativa en la absorción de colesterol exógeno sino en su acción en el hígado, por lo cual la ingesta de pectina de nopal disminuye las concentraciones de colesterol hepático. Otros efectos de la ingesta de la pectina de cladodios y de frutos del nopal es

su actividad antiinflamatoria en el tratamiento de la enteritis (Angulo *et al.*, 2001). Palevitch *et al.* (1993) han recomendado el uso de *O. ficus-indica* en el alivio de síntomas causados por la hipertrofia benigna de próstata.

El mucílago del nopal se considera como pectina, aunque no parece estar químicamente relacionado con la estructura de las pectinas de la pared celular. Se ha propuesto que la biosíntesis del mucílago se lleva a cabo en células especializadas que lo excretan al apoplasto para ayudar a regular el contenido de agua celular durante la fase inicial de deshidratación (Nobel *et al.*, 1992). El papel fisiológico se ha asociado con su capacidad de mantener el agua aún bajo condiciones climáticas desfavorables (Mindt *et al.*, 1975). También se ha sugerido que el mucílago tiene un papel preponderante en la economía del calcio de la planta (Trachtenberg y Mayer, 1981).

Otro compuesto de importancia en el fruto de *O. ficus-indica* es el ácido ascórbico (AsA). En plantas el ácido L-ascórbico es esencial para la fotosíntesis por su actividad en la desintoxicación por peróxido de hidrógeno en los cloroplastos, en ausencia de catalasa (Noctor y Foyer, 1998). Su contenido es grande en tejidos no fotosintéticos, como los órganos de almacenamiento. Además de sus funciones antioxidantes en general, el AsA interviene en la división celular, el metabolismo de la pared celular, la expansión celular y en las interacciones planta-patógeno (Smirnoff y Wheeler, 2000). Los metabolitos intermedios de la biosíntesis del AsA son la D-manosa y L-galactosa, y no se observa acumulación de AsA cuando hay sacarosa, D-glucosa o D-manosa (Hancock *et al.*, 2003).

La digestibilidad de los alimentos depende de la composición celular y, más específicamente, de la composición química. Las células vegetales están constituidas por una fracción correspondiente al contenido celular y otra a la pared celular. El contenido celular posee una digestibilidad casi total, de 98 %. En cambio, la pared celular posee una digestibilidad variable, en función de la proporción en que se encuentren sus componentes: hemicelulosa, celulosa y lignina (Aspinall, 1980). Estos tres elementos químicos constituyen en conjunto la *fibra vegetal*, y es su cantidad como su calidad lo que más afecta la digestibilidad. Los consumidores conocen la relación entre el consumo de fibra y el control de colesterol, y la prevención de enfermedades como diabetes y obesidad (Sloan, 1994; Hollingsworth, 1996; Grijspaardt-Vink, 1996).

La dieta con fibra también puede contribuir a la prevención o tratamiento de enfermedades gastrointestinales asociadas con la falta de ingesta de fibra dietética. Por

tanto, la tendencia es buscar nuevos alimentos naturales en los que la fibra es un componente muy apreciado. La fibra dietética en general se refiere a partes de frutas, verduras, granos, nueces y legumbres que puede no ser digerida por los seres humanos, es decir, que son resistentes a las enzimas digestivas y se integra por componentes químicos resistentes a la digestión, como celulosa, hemicelulosa, pectina, lignina, gomas, y otros. (Spiller, 1992; Periago *et al.*, 1993). Según su solubilidad en agua, la fibra dietética se clasifica como soluble o insoluble; la fibra soluble se compone de mucílago, gomas, pectina y hemicelulosa, mientras que la insoluble se compone de celulosa, lignina y la mayor parte de hemicelulosa (Atalah y Pak, 1997). Un excelente pero relativamente desconocido potencial como fuente de fibra dietética son los cladodios y el fruto de diversas especies de *Opuntia* (Pimienta, 1990)

Así, la digestibilidad de un alimento está dada en función de la cantidad y calidad de fibra que posea. A mayor contenido de fibra y a menor calidad de la misma, menor será la digestibilidad del alimento. Por lo general, cuanto mayor sea el contenido de fibra en detergente neutro (FDN, pared celular) de un alimento menor será su digestibilidad. Pero esto no siempre es así, ya que la digestibilidad de la pared celular depende del grado de lignificación de la misma, de forma que su digestibilidad esta determinada por la cantidad de fibra en detergente ácido (FDA) que posea. A mayor fibra en detergente ácido y a mayor lignina, menor será la digestibilidad del material. De esta manera se puede explicar la correlación estadística existente entre el contenido de FDA y la digestibilidad (Spiller, 1992).

El objetivo del presente trabajo fue analizar la calidad de los frutos normales y partenocárpicos de *Opuntia ficus-indica* cv. CP-Azteca con objeto de completar la información que pueda coadyuvar en su introducción a los mercados nacional y extranjero.

## 2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización del experimento

El trabajo se llevó a cabo en el año 2006 en Tepetlaoxtoc, Estado de México, localizado a 2250 msnm, 19°35' de latitud norte y 98°47' de longitud oeste. El clima es semiseco templado con lluvias en verano (precipitación media anual de 623.2 mm) y escasas el resto del año, con un porcentaje de precipitación invernal de 5 a 10 %. La temperatura promedio anual es de 14.9 °C, y los vientos dominantes son del noroeste durante el invierno, y del noreste en la estación cálido-húmeda, con velocidad media de

3 a 10 km h<sup>-1</sup>. Ocurren heladas de septiembre a marzo, con una frecuencia variable de 10 a 100 días, con predominio de la frecuencia de 40 a 60 días al año. Las granizadas no guardan una regla de comportamiento definida, pero se encuentran asociadas a los periodos de precipitación; su mayor incidencia se observa durante los meses de junio a agosto, con un total de 2 a 6 días por año.

#### Material vegetativo

Se usaron plantas de nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill variedad CP-Azteca de frutos rojos, de nueve años y medio de edad, en una plantación con densidad de cultivo de 0.0625 plantas m<sup>-2</sup> en un terreno con pendiente de 0.5 %.

Se evaluó la calidad en frutos con presencia o ausencia de semillas, mediante dos tratamientos: frutos procedentes de flores con polinización libre (con semilla) y frutos sin semilla procedentes de flores emasculadas y asperjadas con una mezcla de formulación reservada de auxinas, giberelinas y citocininas, método que está en trámite de registro como patente ante el IMPI. Se establecieron dos parcelas con 20 plantas cada una, y a las yemas florales de una de ellas se les aplicó el tratamiento y se dio seguimiento al desarrollo hasta la madurez de los frutos. La unidad experimental estuvo constituida de dos plantas y el número de repeticiones fueron diez plantas. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar.

La temperatura media del aire fue 15.3 °C durante el período de investigación; varió de 11.5 °C (14 de enero) cuando se registraron los primeros brotes de yemas, hasta 15.1 °C (octubre) cuando se hizo la última cosecha de fruto.

La cosecha se realizó en madurez fisiológica, con base en criterios de tamaño de fruto (8 cm de alto fruto normal y 7 cm en fruto partenocárpico), llenado de fruto (5 cm de diámetro ecuatorial en fruto normal y 4 cm en partenocárpico) y pigmentación de la cáscara (80 %) (Cantwell, 1992). El corte de tuna se hizo con navaja en la base del fruto, para favorecer la cicatrización y evitar la pudrición peduncular. Para facilitar la manipulación de los frutos, se eliminaron los ahuates o espinas, y posteriormente se pesaron y trasladaron en cajas al laboratorio para tomar mediciones y realizar análisis de calidad.

#### Variables medidas en fruto

Peso individual (g). Se determinó con una balanza digital con sensibilidad de 0.01 g.

Dimensiones (cm). Con un vernier digital con sensibilidad de 0.001 cm, se midió la longitud (diámetro polar) y el diámetro (ecuatorial) del fruto.

Composición proporcional. Se pesó la cáscara y la pulpa y se calculó la relación peso de cáscara/ peso de pulpa.

Acidez titulable. Se determinó con el método de titulación (AOAC, 1990) a partir de jugo filtrado el cual fue titulado con NaOH (0.1 N) hasta pH de 8, mediante un potenciómetro Corning® Modelo 12. Muestras de 10 g se licuaron con 30 mL de agua destilada, y del filtrado se tomaron alícuotas de 10 mL para la titulación. Los resultados se expresaron en por ciento de ácido cítrico de la pulpa y de la cáscara.

Ácido ascórbico. Del filtrado obtenido en el procedimiento para determinar la acidez titulable, se tomaron 5 mL y se mezclaron con 5 mL de la solución de ácido metafosfórico 5.2 %; La mezcla se confinó herméticamente la mezcla en viales de vidrio y se guardó en refrigeración (- 40 °C). Luego, de cada mezcla se tomaron alícuotas de 1 mL y se mezclaron con soluciones de ácido cítrico (1 N) y bicarbonato de sodio (0.003 N). Se utilizó 2, 6 diclorofenol-indofenol como indicador y se midió la absorbancia a 515 nm en un espectrofotómetro Spectronic 20® (AOAC, 1990).

Contenido de sólidos solubles totales (SST). Los SST se determinaron en el jugo de muestras compuestas tanto de pulpa como de cáscara, con un refractómetro portátil Palette Actago PR-100® (0-32 %); se colocaron dos gotas en el sensor óptico del refractómetro (AOAC, 1990) y se hizo la lectura. Los resultados se expresaron como grados Brix a 20 °C.

Contenido de fibra. Para el análisis de fibra, en detergente ácido y neutro, se separaron la cáscara y pulpa de frutos partenocárpicos y con semilla, se les determinó su biomasa fresca y se dejaron en estufa a 48 °C, hasta peso constante, para medir la biomasa seca. Posteriormente se molieron y se realizaron análisis con cinco repeticiones. La técnica que se siguió separó el contenido celular de la pared celular; de esta última se obtienen dos resultados: Fibra en detergente neutro (FDN) y Fibra en detergente ácido (FDA). La FDN se obtuvo al hervir las muestras en una solución de detergente neutro (sulfato lauril-sódico y ácido etilen-di-amino-tetra-acético, EDTA), y el contenido de FDN se expresó en porcentaje del total de materia seca. Para la FDA, el residuo que queda en la obtención de la FDN se somete a una solución de detergente ácido (ácido sulfúrico y bromuro de acetiltrimetilamonio), proceso con el que se extrae la hemicelulosa; los resultados se expresan en porcentaje de la materia seca evaluada. Adicionalmente se determinaron los porcentajes de materia seca y de cenizas.

Contenido calórico. Para el análisis del contenido calórico se separaron la cáscara y pulpa de 50 frutos partenocárpicos y 50 normales o con semilla; se secaron en el liofilizador LABCONCO® FREEZE DRY SYSTEM/FREEZONE 4.5 del Laboratorio de Fisiotecnia del Colegio de Postgraduados. Posteriormente se molieron con la finalidad de obtener muestras combinadas para los análisis, con 10 repeticiones. La determinación del contenido calórico de cada muestra se hizo con el calorímetro PARR 1266® Bomb Calorimeter (PARR Company Instrument) del Laboratorio de Análisis Nutricional de la Universidad Autónoma Chapingo. El contenido calórico se expresó por unidad de materia seca (g) y por fruto.

Contenido de azúcares. La cáscara y pulpa de frutos partenocárpicos y con semilla se colectaron por separado, luego se molieron con la finalidad de obtener muestras combinadas para los análisis, con diez repeticiones. La medición de azúcares se hizo con la prueba de Nelson (para azúcares reductores) y la de Antrona (para azúcares totales). Para los azúcares reductores se tomaron muestras de 1.0 g a las que se adicionaron 80 mL de etanol 80 % y se hirvieron hasta ebullición durante 15 minutos. El alcohol se evaporó en baño maría y se tomaron muestras que se volvieron a disolver en 100 mL de agua destilada. Se tomaron alícuotas y se mezclaron con los reactivos a y b de Nelson y hizo lectura de la absorbancia a 540 nm en un espectrofotómetro Spectronic 20®. Los resultados se calcularon con base en una curva de calibración hecha con glucosa como estándar y se expresaron en  $\text{mg g}^{-1}$  de peso fresco. Para los azúcares totales se tomaron muestras de 1.0 g y se les adicionaron 80 mL de etanol 80 %, y se hirvieron hasta ebullición durante 15 min en baño maría para evaporar el alcohol; luego se tomaron muestras que se volvieron a disolver en 100 mL de agua destilada, se tomaron alícuotas y se mezclaron con el reactivo de antrona-ácido sulfúrico y se midió la absorbancia a 600 nm. Los resultados se calcularon con base en una curva de calibración hecha con glucosa como estándar y se expresaron en  $\text{mg g}^{-1}$ .

#### Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los resultados se empleó el paquete SAS (The SAS System for Windows V9.1; SAS Institute 2003), con el cual se hizo el análisis de varianza, y en los resultados en que la prueba de F para tratamientos resultaron significativas se hicieron comparaciones de medias mediante la prueba de Tukey, con  $\alpha = 0.05$ .

### 2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tratamiento hormonal indujo aborto de semillas aunque también, redujo significativamente el peso, tamaño y volumen final del fruto sin semilla, pero se logró densidad mayor al fruto normal (Figura 2.1, 2.2 y 2.3 y Cuadro 2.1).

El crecimiento en altura de yema y fruto de *Opuntia ficus-indica* cv. CP-Azteca requirió 150 días en promedio, el diámetro 160 días y para alcanzar la madurez 170 días (Figura 2.4). En su cinética se observaron tres fases de crecimiento: (1) Crecimiento relativamente rápido de las yemas florales que va de la brotación hasta la antesis, fase que duró 50 días, en la antesis se aplicó el tratamiento de emasculación y aplicación de la solución tratamiento. (2) Crecimiento lento del fruto normal por 11 días y por 21 días para el fruto sin semilla; y (3) Un segundo periodo de crecimiento durante el cual el fruto alcanzó su tamaño final (100 días para la altura y 110 para el diámetro) y la madurez en 120 días después de la fase anterior.



Figura 2.1. Frutos partenocárpico de *O. ficus-indica* cv. CP-Azteca completos (izquierda) y corte longitudinal (derecha)



Figura 2.2 Fruto normal (izquierda) y partenocárpico (derecha) de *O. ficus-indica* cv. CP-Azteca



Figura 2.3. Frutos de *O. ficus-indica* cv. CP-Azteca con semilla

Cuadro 2.1. Dimensiones y densidad de tunas con y sin semilla de *O. ficus-indica* cv. CP-Azteca.

Fruto	Peso (g)	Altura (cm)	Diámetro ecuatorial (cm)	Vol. (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g cm <sup>-3</sup> )
Normal	121.54 a	8.40 a	5.29 a	189.18 a	0.65 b
partenocárpico	95.13 b	7.55 b	4.42 b	118.33 b	0.68 a

Medias con la misma letra en cada variable son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05)

La altura de los frutos se incrementó en 0.73 mm d<sup>-1</sup> en promedio antes de la antesis, y posteriormente creció a razón de 0.27 mm d<sup>-1</sup> durante 11 días en fruto con semilla y 0.12 mm d<sup>-1</sup> en fruto sin semilla durante 21 días. A partir de esta fecha la tasa de alargamiento del fruto disminuye hasta alcanzar la maduración. El tamaño promedio final fue de 8.40 cm para el fruto normal y 7.50 cm para el fruto sin semillas (Figura 4), de modo que los frutos sin semilla fueron 12 % más pequeños ( $p < 0.05$ ). El diámetro de los frutos se incrementó en 0.38 mm d<sup>-1</sup> antes de la antesis, cuando medía 3.15 cm; el diámetro para frutos normales se incrementó en 0.23 mm d<sup>-1</sup> durante 11 días mientras que sólo fue 0.09 mm d<sup>-1</sup> en los siguientes 32 días en el fruto sin semilla; a partir del día 100 la tasa de incremento en altura fue cero hasta alcanzar la madurez y en el diámetro fue cero a partir del día 110 (Figura 2.4). El diámetro final del fruto normal fue 5.29 cm y el fruto sin semilla fue 16.4 % más pequeño ( $p < 0.05$ ).

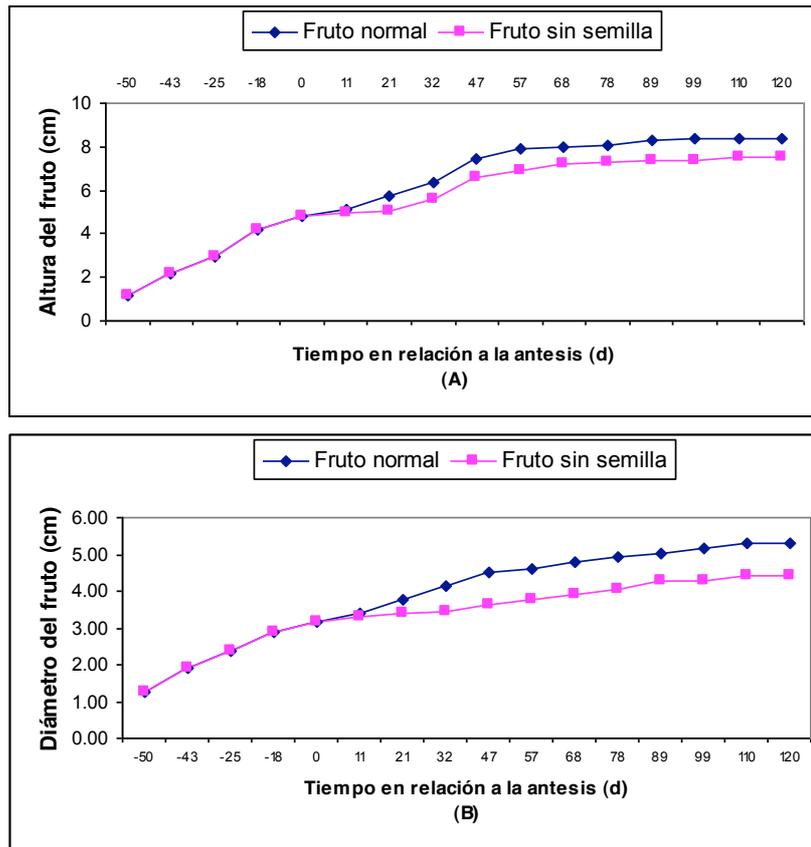


Figura 2.4. Crecimiento de frutos con y sin semilla de *Opuntia ficus-indica* CP-Azteca en (A) altura del fruto y (B) diámetro de fruto. Los datos graficados son medias y desviaciones estándar de 30 frutos.

Las cinéticas de crecimiento en altura y diámetro del fruto de nopal mostraron un patrón de doble sigmoide, consistente con las observaciones previas de López (2006) y Nerd y Mizrahi (1995). El primer periodo de rápido crecimiento que antecede a la antesis, puede deberse a procesos de elongación celular, lo cual sugiere una rápida ganancia de agua y por tanto poca ganancia en materia seca. Durante el siguiente periodo, de muy lento crecimiento, se puede considerar que ocurre un limitado suministro de agua y fotosintatos por parte de la planta, presumiblemente por ocurrir a fines del temporal. El tercer estado de desarrollo, que sigue a la polinización y a la aplicación del tratamiento, fue caracterizado por una alta tasa relativa de crecimiento, posiblemente debido al envío de señales de demanda, tales como el ácido giberélico (Grange, 1993; Srivastava, 2002; Taiz y Zeiger, 2002), originada por los óvulos fertilizados y el tratamiento. En la fase final es cuando el fruto alcanza su tamaño final en diámetro a los 110 días y su altura a los 100 días, pero la madurez se alcanza a los 120 días después de la antesis. Las dimensiones del fruto sin semilla que se encontraron en el presente trabajo, concuerdan con las reportadas por López (2006)

con este cultivar. También concuerdan con las observaciones de Gil y Espinosa (1980); Barbera *et al.*, (1994); De la Barrera y Nobel (2004); Corrales y Hernández (2005) quienes trabajaron con otros genotipos y especies.

El tratamiento para producir tuna sin semilla redujo levemente y en grado no significativo los contenidos de sólidos solubles totales en pulpa y cáscara del fruto y la acidez titulable (Cuadro 2.2). Lo mismo ocurrió con los contenidos de azúcares totales y reductores, excepto en la cáscara en donde la ausencia de semilla normal (no abortada) elevó ( $p \leq 0.05$ ) en 53 % la concentración de azúcares reductores (Cuadro 2.3). La partenocarpia inducida probablemente haya dificultado de la movilidad de azúcares reductores del pericarpio al lóculo (De la Barrera y Nobel, 2004) Estos resultados sugieren la posibilidad de consumir el pericarpio si se eliminan previamente la epidermis, debido al dulzor del mismo, como también lo señala López (2006).

Cuadro 2.2. Contenido de SST en tunas con y sin semilla de *O. ficus-indica* cv. CP-Azteca.

Fruto	Pulpa (° Brix)	Cáscara (° Brix)
Normal	15.05 a	13.47 a
Sin semilla	13.93 a	13.66 a

Medias con la misma letra en cada variable son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05)

La ausencia de semillas no abortadas en el fruto provocó una pérdida considerable de ácido ascórbico en la cáscara, pero no en la pulpa que es lo que se consume principalmente (Cuadro 2.4). Una posible explicación de la baja concentración de AsA en la cáscara de los frutos sin semilla, puede estar relacionada con la cantidad y tipo de carbohidratos reductores, lo cual puede influir en la síntesis del AsA como lo señala Hancock *et al.* (2003).

Cuadro 2.3. Contenido de azúcares en tunas con y sin semilla de *O. ficus-indica* cv. CP-Azteca.

Fruto	Azúcares totales (mg g <sup>-1</sup> )		Azúcares reductores (mg g <sup>-1</sup> )	
	Pulpa	Cáscara	Pulpa	Cáscara
Normal	117.19 a	102.93 a	113.47 a	73.38 b
Sin semilla	98.59 a	82.40 a	108.88 a	110.20 a

Medias con la misma letra en cada variable son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05)

La eliminación de semillas también causó fuertes reducciones en los contenidos de fibra (80 % en pulpa y 40 % en cáscara), tanto en digestión neutra como ácida, pero no modificó significativamente los porcentajes de materia seca y cenizas en pulpa y cáscara (Cuadro 2.5). La cáscara del fruto sin semilla, al ser menos fibrosa y contener

más agua con azúcares que la cáscara del fruto normal, la hace comestible, característica que no ha sido considerada por otros investigadores extranjeros y mexicanos.

Cuadro 2.4. Contenido de ácido ascórbico en tunas con y sin semilla de *O. ficus-indica* var. CP-Azteca

Fruto	Ácido ascórbico (mg 100 g <sup>-1</sup> )	
	Pulpa	Cáscara
Normal	7.99 a	14.93 a
Sin semilla	10.88 a	2.78 b

Medias con la misma letra en cada variable son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05)

Cuadro 2.5. Contenido de fibra en tunas con y sin semilla de *O. ficus-indica* var. CP-Azteca.

Fruto	Materia seca (%)		Cenizas (%)		FDN (%)		FDA (%)	
	Pulpa	Cáscara	Pulpa	Cáscara	Pulpa	Cáscara	Pulpa	Cáscara
Normal	95.55 a	97.67 a	2.23 a	13.70 a	32.26 a	16.50 a	20.83 a	13.21 a
Sin semilla	96.02 a	96.58 a	2.69 a	8.55 a	4.39 b	9.91 b	4.10 b	7.53 b

Medias con la misma letra en cada variable son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05)

En los frutos de *O. ficus-indica* la ausencia de semillas normales no causó diferencias significativas en el contenido calórico de la pulpa y cáscara (Cuadro 2.6). El contenido calórico por ambos tipos de fruto fue relativamente bajo, característica que podría ser útil para recomendar el consumo del fruto sin semilla (79 cal por fruto), a personas con dietas baja en calorías, quienes también tendrían el beneficio de consumir la fibra de la cáscara, la cual no se aprovecha en los frutos con semilla.

La biomasa fresca de frutos que se obtuvo por hectárea y año, fue significativamente mayor en frutos normales (Cuadro 2.7), pero la venta del fruto sin semilla puede representar mayor ganancia para el productor. Si se considera un precio de venta para el fruto normal de \$ 5.00 el kg la venta representaría un ingreso bruto de \$ 60,400.00 por ha, en contraste los frutos sin semilla que con un rendimiento de 7.15 t ha<sup>-1</sup> y un precio de \$ 20.00 por kg, daría un ingreso bruto de \$ 143,000.00 por hectárea.

Cuadro 2.6. Contenido calórico en tunas con y sin semilla de *O. ficus-indica* cv. CP-Azteca.

Fruto	contenido calórico		
	Pulpa (kcal g <sup>-1</sup> )	Cáscara (cal g <sup>-1</sup> )	cal por fruto completo
Normal	3.92 a	3.53 a	91.16 a
Sin semilla	0.37 a	0.35 a	78.01 b

Medias con la misma letra en cada variable son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05)

Cuadro 2.7. Biomasa en tunas con y sin semilla de *O. ficus-indica* cv. CP-Azteca.

Fruto	Biomasa fresca (g)	Biomasa fresca (t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
Normal	121.5 a	12.08 a
Sin semilla	95.1 b	7.15 b

Medias con la misma letra en cada variable son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05)

Los resultados obtenidos en este trabajo y los de López (2006) con la misma variedad, son diferentes a los de otros investigadores que trabajaron con otros genotipos de *O. ficus-indica* o de otras especies, sin resultados satisfactorios, y demuestran que no es posible generalizar resultados a nivel de especie y menos de género, ya que la respuesta depende del genotipo y de su interacción con el ambiente.

## 2.4 CONCLUSIONES

Todos los frutos partenocárpicos resultaron sin semilla, y cuyas características de la pulpa en relación a sólidos solubles totales, acidez titulable, contenido de azúcares totales y reductores, ácido ascórbico y contenido calórico fueron similares a la del fruto con semilla. En los partenocárpicos además la cáscara tiene propiedades que la hacen comestible y logra un precio de venta cuatro veces mayor, por lo que se concluye que la calidad se mantiene y su bajo rendimiento compensa con el mayor precio de venta del fruto partenocárpico.

## 2.5 LITERATURA CITADA

- Angulo H P, C D Díaz, B J A Espinoza, A V E Fernández, T T Aguilar, M Vilca (2001) Actividad Antiinflamatoria de la Tuna (*Opuntia* sp.) en Enteritis Experimental. *QEPO*, 15:22-21.
- A O A C (1990) Official Methods of Analysis Published by the Association of Official Analytical Chemistry. Washington, D.C. Ed. 15 th. 1141p.
- Aspinall G O (1980) Chemistry of cell wall polysaccharides. In: *The Biochemistry of Plants*. Preiss, J. New York, Academic Press: 473p.
- Atalah E and N Pak (1997) Aumente el consumo de verduras, frutas y legumbres. In: Guías de alimentación para la población chilena. Castillo, C; Uauy, R. and Atalah, E. (Eds.). Santiago, Chile. 164p.

- Baugerth F and m Schröder (1994) Strong synergistic effects of gibberellins with the synthetic effects of gibberellins with the synthetic cytokinin N-(2-chloro-4pyridyl)-N-Pheny/urea on parthenocarpic fruit set and some other fruit characteristics of apple. *Plant Growth Regulation* 15:293-302.
- Barbera G, P Inglese, T La Mantia (1994) Influence of seed content on some characteristics of the fruit of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.). *Sciences Horticultural*. 58:161-165.
- Bukovak M J (1963) Induction of parthenocarpic growth of apple fruit with gibberellins A<sub>3</sub> y A<sub>4</sub>. *bot. Gaz.* 124: 191-195.
- Cantwell M (1992) Post-harvest management of fruits and vegetable stems. In: *Agroecology, cultivation and uses of cactus pear*. FAO Plant Production and Protection Paper. pp.120-136.
- Chan B G, J C Cain (1967) The effect of seed formation subsequent flowering in apple. *Proc. Am Soc. Hort. Sci.* 91: 63-68.
- Chang K C, N Dhurandhar, X You, A Miyamoto (1994) Cultivar/location and processing methods affect the quality of sunflower pectin. *Journal of Food Sciences*, 59: 602.
- Chapman B, J J Mondragon, R A Bunch, A H Paterson (2002) Breeding and biotechnology. *In: Cacti Biology and Uses*. P S Nobel (ed). University of California Press. USA. pp. 255-271.
- Corrales G J, J L Hernández S (2005) Cambios en la calidad poscosecha de variedades de tuna con y sin semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 28(1).
- Crane J C, P. M. Primer, R C Campbell (1960) Gibberellin induced parthenocarpy in prunus. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 75: 129-137.
- Crane J C (1963) Parthenocarpic peach development as influenced by time of gibberellin application. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 83: 240-247.
- De la Barrera E, P S Nobel (2004) Nectar: properties, floral aspects, and speculations on origin. *Trends in Plant Science*.
- Dennis F G Jr, L J Edgerton (1962) induction of parthenocarpy in the apple with gibberellin and the effects of supplemental auxin application. *Proc. Am Soc. Hort. Sci.* 80: 57-63.

- Díaz F, G F Gil (1978) Efectividad de diversas dosis y métodos de aplicación del ácido giberélico en la inducción de partenocarpia y en el incremento del fruto de tuna (*Opuntia ficus-indica* Miller). Ciencia e Investigación Agraria V. 5 (3): 109-117.
- Fernández M L, A Trejo, D J McNamara (1990) Pectin Isolated from Prickly Pear (*Opuntia sp.*) Modifies Low Density Lipoprotein Metabolism in Cholesterol-Fed Guinea Pigs. J. Nutr.,120:1283-1290.
- Fernandez M L, E C K Lin, A Trejo, D J McNamara (1994) Prickly Pear (*Opuntia sp*) Pectin Alters Hepatic Cholesterol Metabolism without Affecting Cholesterol Absorption in Guinea Pigs Fed a Hypercholesterolemic Diet. J. Nutr.,124:817-824.
- Flores V C, C Gallegos V (1993) Situación y perspectivas de la producción y comercialización de tuna en la región centro y norte de México. CRUCEN-CIESTAAM, Universidad Autónoma Chapingo. pp: 5-27.
- Gil G F, M Morales, A Momberg (1977) Cuaja y desarrollo del fruto de tuna (*Opuntia ficus-indica*, Mill.) y su relación con la polinización y con los ácidos giberélico y cloroetilfosfónico. Ciencia e Inv. Agraria 4 (3):163-169.
- Gil G F, A Espinosa R (1980) Desarrollo de frutos de tuna (*Opuntia ficus-indica*, Mill.) con aplicación prefloral de giberelina y auxina. Ciencia e Inv. Agraria 7 (2):141-147.
- Grange R I (1993) Crecimiento del fruto. In: Ascon-Bieto J, Talon M, eds. Fisiología y bioquímica vegetal. Madrid: McGraw-Hill-Interamericana, 22-462.
- Grijspaardt-Vink C (1996) Ingredients for healthy foods featured at European Expo. Food Tech. 2(30)
- Hancock Robert D, D McRae, S Haupt, V Roberto (2003) Synthesis of L-ascorbic acid in the phloem. BMC Plant Biology, 3:7
- Hollingsworth P (1996) Food trends: diversity and choice dominate. Food Tech. 5(40).
- Inglese P, F Basile, M Schirra (2002) Cactus pear fruit production. *In*: Nobel P S (ed.). Cacti Biology and Uses. University of California Press, USA. Pp. 163-183.
- Jarvis M C (1984) Structure and properties of pectin gels in plant cell wall. Plant Cell Environ.,7:153.

- López S M. 2006 Influencia de la partenocarpia en la calidad poscosecha de tuna (*Opuntia ficus-indica* L. Mill): El caso de la tuna fresa sin semilla. Tesis de M. en C. Recursos Genéticos y Productividad, Fisiología Vegetal. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Edo. México.
- Mindt L, K Saag, G R Sanderson, P Moyna, G Ramos (1975) Cactaceae mucilage composition. J. Sci. Fd. Agric.,26:993.
- Muratalla L A, M Livera M, C Hernández R, V González H (2002) Tuna Fresa sin semilla: reseña de un nuevo concepto de calidad de fruto de nopal (*Opuntia ficus-indica*) hecho realidad. Congreso Nacional de Fitogenética. 1-15 de septiembre. Saltillo, Coahuila., México.
- Nerd A, Y Mizrahi (1995) Reproductive biology. In: Barbera G, Inglese P, Pimienta-Barrios E, eds. Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear. Plant Production and Protection Paper 132. Rome: FAO, pp. 49-57.
- Nobel P, J Cavelier, J L Andrade (1992) Mucilage in cacti: its apoplastic capacitance, associated solutes, and influence on tissue water relations. Journal Experimental Botanical, 43:41-64.
- Noctor G, CH Foyer (1998) Ascorbate and glutathione: Keeping active oxygen under control. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 49:249-279.
- Ortiz H J D (1988) Efecto del ácido giberélico y auxinas en el fruto de nopal tunero (*Opuntia amyoclaea* T.). Tesis M.C. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 141 pp.
- Pavlevitch D, G Earon, I Levin (1993) Treatment of benign prostatic hypertrophy with *Opuntia ficus-indica* (L) Miller. J. Herbs Spices Med. Plants, 2:45-49
- Periago M J, G Ros, G López, M C Martínez, F Rincon (1993) The dietary fiber components and their physiological effects. Revista Española de Ciencia y Technol. Aliment. 33(3):229-246.
- Pimienta E (1990) El Nopal tunero. 1a ed. Universidad de Guadalajara, Jalisco, México. 246 pp.
- Pimienta B E, E M Engleman (1985) Desarrollo de la pulpa y proporción, en volumen de los componentes del lóculo maduro en tuna (*Opuntia ficus indica* (L) Miller). Agrocienza 62: 51-56.
- Rademacher F (1994) Gibberellin formation in microorganisms. Plant Growth Regulation 15: 303-314.

- Rodríguez A J, R Cano M (2002) Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Patente No. 211431
- Ryugo K (1988) Fruit Culture: Its science and Art. Univ. Calif. John Willey & Sons. N.Y. 344 p.
- SAS Institute (2003) Statistical Analysis System, Software version 9.1, SAS Institute, Cary, NC USA.
- SIAP (2007) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (<http://www.siap.gob.mx/>). (19 de Septiembre de 2007).
- Simmonds N W (1953) Segregations in some diploid bananas. J. Genet. 51: 458-469
- Sloan E (1994) Top ten trends to watch and work on. Food Tech. 7: 89-100.
- Smirnoff N, G L Wheeler (2000) Ascorbic acid in plants: Biosynthesis and function. Critical Rev Biochem Mol Biol, 35:291-314.
- Spiller G (1992) Definition of dietary fiber. In: Dietary Fiber in Human Nutrition. Gene A. Spiller (Ed.). CRC Handbook. 2nd Ed. Boca Raton, Florida. pp. 15-18.
- Srivastava L M (2002) Plant growth and development: hormones and environment. San Diego, CA: Academic Press.
- Taiz L, E Zeiger (2002) Plant physiology, 3rd edn. Sunderland, MA: Sinauer.
- Trachtenberg S, A M Mayer (1981) Composition and Properties of *Opuntia ficus-indica* Mucilage. Phytochemistry, 20: 2665-2668.
- Villarreal F, P Rojas, V Arellano, J Moreno (1963) Estudio químico sobre seis especies de nopales (*Opuntia* spp.). Ciencia Méx. 22:59-65.

## CAPÍTULO III

### Eficiencia de *Opuntia ficus-índica* cv. CP-Azteca en el uso de la radiación fotosintéticamente activa y del agua en la producción de biomasa en condiciones de riego y temporal

La eficiencia en el uso de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) se calculó como el cociente entre el valor energético de la materia orgánica producida por unidad de área cultivada y la RFA incidente en la misma área en el mismo período; y la eficiencia en el uso del agua como la biomasa producida por unidad de agua utilizada.

El objetivo de éste trabajo fue evaluar la eficiencia en el uso de la RFA en la síntesis de biomasa y el uso eficiente del agua en plantas de nopal *Opuntia ficus-índica* cv. CP-Azteca bajo condiciones de riego y temporal. El diseño fue de bloques completos al azar con veinte repeticiones. La unidad experimental consistió de una planta.

La eficiencia en la conversión de RFA en biomasa fue mayor en condiciones de riego (1.94 %) que en temporal (1.27 %), pero la eficiencia en el uso del agua fue mayor en condiciones de temporal ( $1.49 \text{ kg}_{(MS)} \text{ t}^{-1}_{(agua)}$ ) que en riego ( $1.08 \text{ kg}_{(MS)} \text{ t}^{-1}_{(agua)}$ ).

Palabras clave: *Opuntia ficus-indica* var. CP-Azteca, radiación fotosintéticamente activa, eficiencia, intercepción, uso eficiente del agua.

### 3.1 INTRODUCCIÓN

La radiación solar total que incide sobre el dosel de los cultivos tiene un intervalo de longitud de onda de 380 a 4000 nm; para fotosíntesis las plantas utilizan sólo la radiación de 400 a 700 nm, definida como la radiación fotosintética activa (RFA), y corresponde aproximadamente a 48-50 % de la radiación solar total incidente (Nobel, 1991a; Jones, 1992). El resto de la radiación solar absorbida por el área fotosintética induce efectos térmicos, al afectar la temperatura foliar y la tasa de transpiración (Gallo y Daughtry, 1986). La radiación solar influye también en el crecimiento y desarrollo de los cultivos por sus efectos en la fotomorfogénesis y la muta-morfogénesis (Gates, 1980; Jones, 1992). La radiación global del sol (irradiancia) corresponde en promedio a  $20.223 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

La RFA es la región del espectro solar cuya longitud de onda está comprendida entre 400 y 700 nm. Los niveles de la RFA son importantes porque intervienen en diversos procesos biológicos y su evaluación es de interés por su relación con el crecimiento de los cultivos. Debido a que las plantas realizan fotosíntesis y que la RFA es su fuente de energía, conocer la distribución espacial y temporal de la misma es fundamental para el análisis de los procesos biológicos. La RFA se mide en términos de densidad de flujo de energía como irradiancia fotosintética ( $\text{W m}^{-2}$ ) o como densidad de flujo de fotones fotosintéticos (DFFF;  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

En nopal (*Opuntia sp.*) los cladodios interceptan la radiación solar necesaria para fotosíntesis; por tanto, el cultivo debe desarrollar suficiente área para una máxima interceptación de radiación y para la síntesis de los carbohidratos necesarios para su desarrollo (Monteith y Unsworth, 1990; Jones, 1992; Otegui *et al.*, 1995). El primer efecto de una disponibilidad baja de RFA es una reducción de la fotosíntesis y del aporte de fotoasimilados para la producción de biomasa (Hashemi-Dezfouli y Herbert, 1992; Westgate *et al.*, 1997).

Con un manejo que incluya riegos oportunos y fertilización el rendimiento del cultivo estará en función de la interceptación de RFA y su repercusión en la acumulación neta de bióxido de carbono durante el ciclo de crecimiento (Gallagher y Biscoe, 1978; Otegui *et al.*, 1995). Esto, a su vez, es función de la tasa de interceptación de la radiación solar y la eficiencia del uso de dicha energía para la fijación de moléculas de  $\text{CO}_2$  (Shibles y Weber, 1965; Jones, 1992).

La producción de biomasa de un cultivo es función directa de su índice de área fotosintética (cantidad de follaje requerido para interceptar el mayor porcentaje de la radiación incidente). A valores menores o mayores de este índice óptimo de área fotosintética, el rendimiento de biomasa disminuye (Karlen y Camp, 1985; Hashemi-Dezfouli y Herbert, 1992; Andrade *et al.*, 1992): con valores menores, parte de la radiación solar no será interceptada por el follaje; con valores mayores, la proporción del sombreado se incrementa y tanto la relación fotosíntesis: respiración como el rendimiento disminuyen (Andrade *et al.*, 1992; Wells, 1991). El rendimiento agronómico (frutos, semillas, etc.) depende del índice de cosecha, que es la relación entre el rendimiento agronómico y la biomasa total producida.

El balance de radiación a la hora de realizar estudios sobre la radiación en cubiertas vegetales se simplifica al considerar que la radiación Interceptada ( $RFA_{INT}$ ) se puede estimar a partir de la radiación incidente ( $RFA_{INC}$ ) por medio de la expresión (Gallagher y Biscoe, 1978):

$$RFA_{INT} = (e) (RFA_{INC})$$

Donde “e” es la eficiencia de la intercepción. Dicha eficiencia será 1 cuando la cubierta vegetal no transmite radiación al suelo y toda la radiación incidente es interceptada, y 0 cuando no hay cubierta vegetal. La eficiencia depende del grado de densidad de la cubierta vegetal, de forma que “e” se puede expresar en función de la superficie fotosintética expresada como índice de área foliar, IAF (en nopal, IAF = superficie de una cara de los cladodios/superficie de terreno ocupado):

$$e = e_{m\acute{a}x} (1 - e^{-k \cdot IAF})$$

Al aumentar el IAF aumenta la eficiencia de la intercepción de la radiación hasta llegar a un valor máximo. A partir de ese valor máximo, que es variable según el cultivo y el medio, no se incrementa la intercepción de la radiación, de forma que un aumento de la superficie foliar no será beneficioso para aumentar el rendimiento. Una adecuada elección del marco de plantación o de la densidad de siembra será fundamental para obtener la máxima producción por unidad de superficie (Gallagher y Biscoe, 1978).

La productividad refleja los efectos acumulativos de los diferentes factores que influyen sobre el crecimiento. En los ambientes naturales los factores que pueden

limitar el crecimiento son: la disponibilidad de agua en el suelo, la temperatura, el flujo de fotones fotosintéticos (FFF) y el contenido de nutrimentos en el suelo (Nobel, 1998). La producción potencial de un cultivo expresada como biomasa total, si se considera que no hay algún otro factor limitante, será función de la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada. Se han establecido relaciones lineales entre la productividad potencial y la cantidad de radiación interceptada ( $RFA_{INT}$ ) (Gallagher y Biscoe, 1978). Mediante comparación de los datos de producción potencial con la real se podría conocer a qué nivel de optimización se está en un momento dado; se podría también rechazar la introducción de un cultivo en una zona en función de valores de radiación que no dieran una producción rentable.

En cuanto a los procesos morfogénicos, la fotomorfogénesis hace referencia a la influencia de la luz sobre el desarrollo de la estructura de las plantas (Gates, 1980; Jones, 1992). La luz también es responsable de muchos movimientos o tropismos. Otro concepto importante es el fotoperiodismo (conjunto de fenómenos determinados por la duración del período de luz).

Mediciones en laboratorio han mostrado que la eficiencia fotosintética es mayor con niveles bajos de radiación (Nobel, 1983; Norman y Arkebauer, 1991; Jones, 1992). Esto se debe a que el área fotosintética se foto satura cuando está expuesta a la radiación solar directa, lo que ocurre en todas las hojas de plantas  $C_3$ . Aunque las hojas de las plantas  $C_4$  no alcanzan la saturación, la eficiencia de la fotosíntesis también es mayor con niveles bajos de radiación. Las plantas con metabolismo ácido de las crasuláceas (MAC) como el nopal, crecen en ambientes en donde la radiación solar directa es alta y no se alcanza la saturación (Nobel, 1983).

Las propiedades espectrales del dosel de los cultivos dependen de la densidad y distribución espacial de las hojas, y pueden evaluarse mediante los índices de reflectancia, absorbancia o intercepción y transmisividad o transmitancia, los cuales corresponden a la fracción de la radiación incidente que se refleja, intercepta y transmite (Jones, 1992). La suma de estos índices es igual a la unidad para cualquier longitud de onda o banda. La eficiencia de captación de radiación de un dosel podría evaluarse por medio de los índices de reflectividad e intercepción de la radiación: un dosel eficiente deberá tener un índice alto de intercepción de la RFA y una reflectividad alta a la banda de radiación cercano al infrarrojo (0.74-1.2  $\mu\text{m}$ ), para así reducir los

efectos del calentamiento de las hojas y de la tasa de transpiración ocasionadas por la radiación infrarroja (Maddonni y Otegui, 1996).

La eficiencia en el uso de la radiación puede ser calculada por comparación entre el valor energético de la materia orgánica producida por unidad de área cultivada y la radiación incidente en la misma área en el mismo período (Ortiz, 1987). La eficiencia del crecimiento, definida como la energía equivalente de materia seca (biomasa) por unidad de energía interceptada, tienen un valor entre 2 y 2.5 % para diferentes cultivos (Monteith, 1981) y se han encontrado valores de 1.3 a 4.2 g MJ<sup>-1</sup> considerándose como límite teórico 6.4 g MJ<sup>-1</sup>. Rosenberg *et al.*, (1983) (citados por Ayala, 1995), consideran que las mejores prácticas de cultivo rinden eficiencias fotosintéticas no más grandes al 1 % de la radiación global incidente. Kirkham y Smith (1984) (citados por Ayala, 1995), señalan que si los cultivos sólo utilizan entre 1 y 2 % de la energía disponible, el objetivo primario de las investigaciones agrícolas debería ser incrementar la RFA interceptada por los doseles a través de prácticas agrícolas como el riego y la fertilización. Ayala, (1995) encontró en trigo (*Triticum aestivum* L.) variedad Gálvez M87 que la eficiencia en la conversión de RFA en biomasa fue de 1.34 %.

El objetivo de esta investigación fue determinar la intercepción de la RFA por el dosel del nopal *Opuntia ficus-indica* cv. CP-Azteca y su eficiencia para transformarla en biomasa en condiciones de riego y temporal.

### 3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

#### Localización del experimento

Este trabajo se efectuó en el año 2006 en Tepetlaoxtoc, Estado de México, localizado a 2250 msnm, 19°35' de latitud norte y 98°47' de longitud oeste. El clima del sitio es semiseco templado con lluvias en verano (precipitación media anual de 623 mm) y escasas el resto del año, con una precipitación invernal de 5 a 10 %. La temperatura promedio anual es 14.9 °C, y los vientos dominantes son del noroeste durante el invierno, y del noreste en la estación cálido-húmeda, con velocidad media de 3 a 10 km h<sup>-1</sup>. Inciden heladas de septiembre a marzo, con una frecuencia variable de 10 a 100 días, con predominio de la frecuencia de 40 a 60 días al año (García, 1978).

#### Material vegetativo

La experimentación se realizó en plantas de nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill cv. CP-Azteca de frutos rojos, de nueve años de edad, en una plantación con densidad de

cultivo de 0.0625 plantas  $m^{-2}$  distribuidas uniformemente en un terreno que presenta una pendiente de 0.5 %.

El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar con veinte repeticiones. La unidad experimental consistió en una planta; Las medias se compararon con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

#### Mediciones de radiación e instrumentación

La información necesaria para determinar la RFA interceptada por el dosel en ambos tratamientos de humedad edáfica, fue obtenida con mediciones simultáneas de la radiación global ( $W m^{-2}$ ) monitoreada con un piranómetro instalado en la estación meteorológica automática (Dynamax® SL100397), y de la irradiancia fotosintética ( $W m^{-2}$ ) monitoreada con un sensor lineal (LI-188®; LI-COR, Nebraska, EE.UU.)

La RFA reflejada por el dosel en condiciones de riego y de temporal ( $RFA_{ref}$ ), se estimó con base en mediciones con el sensor lineal ubicado a 1 m de altura y orientado hacia el centro de cada unidad experimental por 10 min, mediante lecturas cada 2 s para generar promedios cada 5 min.

La radiación fotosintéticamente activa transmitida se determinó a partir de mediciones consecutivas de la RFA, una en la parte superior de la planta (RFA incidente) y tres mediciones en su base, con el sensor lineal, tanto en forma perpendicular como paralela al surco de plantación. Con los tres valores de la RFA en el suelo se obtuvo un promedio con el cual se determinó el porcentaje que representaba la RFA transmitida de la RFA incidente. La medición en cada unidad experimental se realizó 3 veces a diferentes horas del día.

Para determinar la intercepción de RFA en plantas bajo condiciones de riego y temporal, al total de RFA incidente se restó la RFA reflejada y la RFA transmitida que llegaba al suelo. El índice de reflexión de la radiación fotosintética activa se obtuvo al dividir RFA reflejada entre RFA incidente.

#### Área fotosintética

Para el cálculo del área fotosintética total por unidad experimental se hizo como sigue: se tomaron 800 muestras de cladodios de diferentes tamaños y de cada uno se midió el largo y ancho mayores ( $M_1$ ). Luego se dibujó su silueta en cartulina y el área de la silueta recortada ( $M_2$ ) se midió con el Integrador de Área Foliar LI-3000® de Li-COR Inc. (Lincoln, Nebraska, EE.UU.), del Laboratorio de Fisiotecnia. Con los valores de  $M_1$  y  $M_2$  se hizo una regresión y se obtuvo una ecuación lineal. Luego se midió el

largo y ancho de todos los cladodios de las unidades experimentales y con la ecuación se calculó el área fotosintética total.

### Medición del contenido calórico

Para determinar la biomasa aérea seca total producida en las unidades experimentales y su equivalente energético, fue necesario calcular el contenido calórico del total de frutos, cladodios y periantos producidos. Para los frutos se tomaron 50 muestras de cada tratamiento, y se pesaron. Luego se separó cáscara y pulpa y se determinó el peso de cada parte. Se juntaron las cáscaras de cada tratamiento, se secaron en el liofilizador LABCONCO® FREEZE DRY SYSTEM/FREEZONE 4.5 del Laboratorio de Fisiotecnia del Colegio de Postgraduados y se molieron para realizar los análisis del contenido calórico con tres mediciones. El mismo procedimiento se utilizó para la pulpa.

Para las flores se tomaron 200 muestras de cada tratamiento, se pesaron y secaron en estufa a 70 °C hasta peso constante. Se juntaron las flores de cada tratamiento y se molieron para realizar los análisis de contenido calórico con tres repeticiones por tratamiento.

Cincuenta cladodios de cada tratamiento se pesaron y secaron en estufa a 70 °C hasta peso constante. Se juntaron los cladodios de cada tratamiento y se molieron para realizar los análisis de contenido calórico, éstos se hicieron en tres repeticiones por tratamiento.

La determinación del contenido calórico en flores, cladodios, cáscara y pulpa de frutos, se hizo con el calorímetro PARR® 1266 Bomb Calorimeter; PARR Company Instrument, del Laboratorio de Análisis Nutricional, en la Universidad Autónoma de Chapingo. Las muestras para contenido calórico fueron de 1 g de biomasa de cada parte de la planta.

### Riego

El sistema de riego en la condición de humedad, consistió de mangueras colocadas en cada línea o surco de plantación, cada una con aspersores ubicados cada 5 m con un radio de riego de 2.5 m y un gasto de 46.5 L h<sup>-1</sup>. La programación y volumen de los riegos fue la necesaria para conseguir una lámina de agua (LC) capaz de mantener el suelo a capacidad de campo (CC), de acuerdo con las propiedades del mismo (Cuadro 3.1) y a la evaporación registrada (Torres, 1995).

$$LC = [(CC-PMP)/100] (DA) (PR)$$

LC = lámina de agua calculada (cm); CC = capacidad de campo (%); PMP = punto de marchitamiento permanente (%); DA=densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ); PR = profundidad de la raíz.

Cuadro 3.1. Valores de las principales propiedades físicas del suelo.

Propiedad	Valor
Capacidad de campo (CC)	22.85 %
Punto de marchitamiento permanente (PMP)	16.70 %
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	21.40 meq/100 g
Conductividad eléctrica (CE)	0.60 dS $\text{m}^{-1}$
Densidad aparente (DA)	1.26 $\text{g cm}^{-3}$
Textura	franco-arenosa

### 3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La radiación global incidente registrada en el área de estudio en el período enero-julio (período de emergencia de yemas vegetativas y florales a madurez de fruto) fue de 4592.56  $\text{MJ m}^{-2}$ , y la correspondiente RFA fue 49.6 %. La RFA reflejada en promedio fue de 7.5 % y la RFA que llega al suelo en condiciones de riego fue 48.3 % y en temporal 40.42 % (Cuadro 3.2). El índice de transmisividad registrado fue alto, en concordancia con lo reportado por Nobel (1983) y Jones (1992) quienes plantearon que en nopal los índices de RFA transmitida y RFA reflejada son mayores que el promedio de las plantas, debido a su estructura, propiedades de cutícula y a la alta insolación.

La RFA interceptada en riego fue 44.2 % y en temporal de 52.3 % (Cuadro 3.2). La mayor interceptación correspondió a plantas en condición de temporal lo cual se debió al mayor número de cladodios viejos y jóvenes (Cuadro 3.3 y 3.4).

El riego provocó un incremento en la brotación de yemas florales y una disminución de yemas vegetativas (Cuadro 3.3) lo cual difiere con lo reportado por otros autores. Taíz y Zeiger (1998) y Fosket (1994) señalan que el estrés hídrico induce la síntesis de ACC (1 aminociclopropano-1-ácido carboxílico) compuesto que interviene en la biosíntesis de etileno que induce diferenciación de yemas florales e inhibe la brotación de yemas vegetativas como sucede en piña (*Anonas comosus*) (Abeles *et al.*, 1992).

Aguilar y Peña (2006) señalan que el estrés hídrico en *O. ficus-indica* reduce las clorofilas y actividad de la enzima fosfoenol piruvato carboxilasa en un 19.6 % lo cual puede explicar que las plantas en éstas condiciones diferencien los meristemas en yemas vegetativas en porcentaje mayor. La condición de riego podría inducir la síntesis

de etileno y la brotación de yemas florales en un porcentaje mayor, como lo demostró Aguilar (1994), quien aplicando etileno mediante inyección de 10 mL de ethrel 0.1 % a cladodios de *O. ficus-indica* aumentó la brotación floral.

Cuadro 3.2. RFA reflejada, transmitida, e interceptada por *O. ficus-indica* en condiciones de riego y temporal, durante el período de enero a julio del 2006.

Condición	Radiación Fotosintéticamente Activa (MJ m <sup>-2</sup> )			
	Incidente	Reflejada	Transmitida	Interceptada (%)
Riego	2277.9	170.8	1100.2	44.2
Temporal	2277.9	170.8	915.7	52.3

La biomasa promedio producida por unidad experimental en ambas condiciones de humedad edáfica mostró diferencias significativas entre tratamientos, y fue mayor (5.34 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) en riego, con un aporte hídrico de 4955.29 t ha<sup>-1</sup>, que en temporal (4.98 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) con un aporte hídrico por lluvia de 3328 t ha<sup>-1</sup>, valores semejantes a los obtenidos por Nobel (1983), Nobel y Hartsock (1986) y García de Cortázar y Nobel (1991). La eficiencia en el uso del agua fue mayor en temporal (1.49 kg<sub>(MS)</sub> t<sup>-1</sup><sub>(agua)</sub>) que en riego (1.08 kg<sub>(MS)</sub> t<sup>-1</sup><sub>(agua)</sub>), valores inferiores a la mayoría de plantas C<sub>3</sub> (1.59 kg<sub>(MS)</sub> t<sup>-1</sup><sub>(agua)</sub>) y C<sub>4</sub> (3.44 kg<sub>(MS)</sub> t<sup>-1</sup><sub>(agua)</sub>). Una posible explicación para estos bajos valores es que el índice de área del tallo (1.19 en riego y 1.29 en temporal) y la densidad de plantación (0.0625 plantas m<sup>-2</sup>) son bajos. La productividad anual disminuye al disminuir el índice del área de tallo y la densidad de plantación óptimos (Nobel, 1998). En la práctica, los espacios abiertos necesarios para la cosecha y otras prácticas agrícolas ocasionan que la productividad por unidad de superficie de suelo sea menor. La productividad alcanza el máximo a un índice de área del tallo de 4 a 5 y la productividad predicha para *Opuntia ficus-índica* es de casi 40 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en base seca de la porción aérea a una densidad de 24 a 30 plantas m<sup>-2</sup> (Nobel, 1998).

Además de la densidad de siembra, la productividad también puede incrementarse si se proporciona agua al suelo. Bajo las condiciones húmedas que se emplearon, el peso seco con respecto al peso fresco fue de 6.97 % para cladodios y 18.26 % para frutos, y su productividad en peso fresco fue de 55.34 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en riego y 59.79 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en temporal. Como este estudio se realizó en una baja densidad de plantación y con un índice de área de tallo bajo, es de esperarse que se obtengan mayores productividades a una densidad de plantas mayor.

Existe relación entre el peso seco de los cladodios de *Opuntia ficus-índica* y la capacidad para sostener el crecimiento de frutos. Sólo producen frutos los cladodios con un peso seco de al menos 33 g (Nobel, 1998). Es necesario un mayor peso seco sobre el valor mínimo, como reserva fotosintética para que aporte azúcar y otros compuestos orgánicos a las flores y a los frutos. Nobel (1998) reporta que cladodios con un peso seco considerable pueden producir hasta 6 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de fruto en base seca, 30 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de peso fresco. En este trabajo el promedio de peso seco de cladodios en riego fue 65.06 g y en temporal de 66.13 g y sus correspondientes producciones en fruto fue de 12.68 y 6.95 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de peso fresco.

Las plantas CAM tienen gran eficiencia en el uso del agua porque la apertura estomática es nocturna, lo que disminuye la pérdida de agua. El mecanismo CAM permite a las plantas mejorar la eficiencia del uso del agua. Típicamente una planta CAM pierde de 50 a 100 g de agua (transpiración) por cada gramo de CO<sub>2</sub> asimilado, en comparación con valores de 250 a 300 gramos y de 400 a 500 g para las plantas C<sub>4</sub> y C<sub>3</sub> respectivamente. Así, las plantas CAM tienen una ventaja competitiva en ambientes secos (Taiz y Zeigler, 1998). La tasa de mol de CO<sub>2</sub> fijado por mol de agua transpirada es 6.3 x 10<sup>-3</sup> a 4 x 10<sup>-3</sup> en plantas CAM, en C<sub>3</sub> va de 0.6 a 1.3 x 10<sup>-3</sup> y en C<sub>4</sub> de 1.7 a 2.4 x 10<sup>-3</sup> (Lee y Griffiths, 1987). La eficiencia mayor en el uso del agua en las plantas de temporal se puede explicar por la menor tasa transpiratoria debida al menor tiempo de apertura estomática (Nobel, 1991b). En condiciones de riego el peso seco fue mayor en frutos y flores mientras que en temporal fue mayor para cladodios (Cuadro 3.3), resultados atribuibles a un mayor estímulo de desarrollo de yemas reproductivas que de yemas vegetativas en condiciones de riego (Aguilar, 1994; Aguilar y Peña, 2006).

Cuadro 3.3. Promedios de biomasa sintetizada en frutos, cladodios y flores en *O. ficus-índica* cv. CP-Azteca por unidad experimental bajo condiciones de riego y temporal

Condición	Frutos (g)		Cladodios (g)		Flor (g)	
	No.	Biomasa	No.	Biomasa	No.	Biomasa
Riego	159 a	15362.6 a	73 b	4760.0 b	159 a	82 a
Temporal	120 b	11055.9 b	89 a	5870.0 a	120 b	45 b

Medias con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey, p ≤ 0.05)

La ecuación que se obtuvo de la regresión entre las dimensiones de los cladodios y el área medida con el integrador del área foliar fue:

$$\text{Área Foliar} = (\text{Largo} \times \text{Ancho}) (0.72117879), R^2 = 0.98; CV = 4.7 \%$$

El área fotosintética promedio de cladodios de las unidades experimentales con una edad mayor de 1 año, determinada con la ecuación de regresión, fue de 62.27 m<sup>2</sup> en riego y de 71.60 m<sup>2</sup> en temporal.

El contenido energético en calorías por gramo de frutos y cladodios no mostró diferencias significativas en frutos, mientras que en flor fue mayor en condiciones de temporal y en cladodios en condiciones de riego (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Contenido energético de un gramo de biomasa de fruto, cladodio y flor en *Opuntia ficus-indica* cv. CP-Azteca bajo condiciones de riego y temporal

Condición	Contenido energético de la biomasa (kJoules g <sup>-1</sup> )		
	Fruto	Cladodio	Flor
Riego	15.6 a	13.1 a	17.3 b
Temporal	15.7 a	12.7 b	17.8 a

Medias con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0.05$ )

El total equivalente de biomasa acumulada fue de 76186.04 MJ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en condiciones de riego y en temporal acumuló 67695.07 MJ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. La eficiencia en la conversión de la RFA en biomasa fue significativamente mayor en condiciones de riego que en temporal (Cuadro 3.5). Nobel y Hartsock (1986) consideran que en condiciones apropiadas de RFA, humedad edáfica y temperatura, la ganancia de biomasa en *Opuntia ficus-indica* es mayor a condiciones de estrés de cualquiera de éstos factores, lo cual explica las diferencias en producción debido a las diferencias en cantidad de agua en los dos tratamientos.

Debido a que la intercepción diaria de RFA se expresa en MJ m<sup>-2</sup> de área de tallo por día, el área de tallo multiplicado por la intercepción dará la radiación total interceptada por la planta (Nobel, 1998)

Cuadro 3.5. Eficiencia en la transformación de la RFA en biomasa en *Opuntia ficus-indica* cv. CP-Azteca.

Tratamiento	Energía (MJ ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )				RFA interceptada	Eficiencia (%)
	Fruto	Cladodio	Capítulo floral	Total		
Riego	36557 a	38743 b	886 a	76186 a	3918393 b	1.9443187 a
Temporal	20323 b	46869 a	502 b	67695 b	5331545 a	1.2697082 b

Medias con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0.05$ )

García de Cortázar y Nobel (1991) encontraron producciones de biomasa de 40 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de cladodios en *Opuntia ficus-índica* y posteriores análisis indican que la producción de materia seca puede alcanzar 50 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Para *Opuntia ficus-índica* el índice de área fotosintética medio de 0.69 tiene una productividad de 1.4 kg m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> (14 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) (Nobel y Hartsock, 1986)

## CONCLUSIONES

La eficiencia en la conversión de RFA en biomasa fue mayor en condiciones de riego (1.94 %) que en temporal (1.27 %), pero la eficiencia en el uso del agua fue mayor en condiciones de temporal (1.49 kg<sub>(MS)</sub> t<sup>-1</sup><sub>(agua)</sub>) que en riego (1.08 kg<sub>(MS)</sub> t<sup>-1</sup><sub>(agua)</sub>).

## BIBLIOGRAFÍA

- Abeles F B, P W Morgan, M E Saltveit (1992) Ethylene in Plant Biology. Academic Press. San Diego. pp: 1-50.
- Aguilar B G (1994) Respuesta del nopal (*Opuntia ficus-indica* Mill.) a la inyección de agroquímicos, daños por heladas y poda de raíz. Rev. Fitotec. Mex. 17(2): 186-193.
- Aguilar B G, C B Peña V (2006) Alteraciones fisiológicas provocadas por sequía en nopal (*Opuntia ficus-indica* Mill.). Rev. Fitotec. Mex. 29(3): 231-237.
- Andrade F H, S A Uhart, G G Arguissain, R A Ruiz (1992) Radiation use efficiency of maize grown in a cool area. Field Crop Res. 28: 345-354.
- Ayala Garay O J (1995) Estudio Micrometeorológico del Cultivo de Trigo (*Triticum aestivum* L.) en Montecillo, México. Tesis de Licenciatura, Ingeniero Agrónomo especialista en Fitotecnia. U.A.Ch., Chapingo, Méx. México. 221 p.
- Fosket E D (1994) Plant Growth and Development. Academic Press USA. pp: 317-323.
- Gallagher J N, P V Biscoe (1978) Radiation absorption, growth and yield of cereals. J. Agric. Sci. Camb. 91: 47-60.
- Gallo K P, C S T Daughtry (1986) Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. Agron. J. 78: 752-756.

- García de Cortázar V, P S Nobel (1991) Prediction and measurement of high annual productivity for *Opuntia ficus-índica*. *Agricultural and Forest Meteorology* 56(3-4): 261-272
- García E (1978) Los climas del valle de México. Colegio de Postgraduados S.A.R.H. Chapingo, México. 63 pp.
- Gates D M (1980) *Biophysical Ecology*. Springer-Verlag. New York, USA. 611 p.
- Hashemi-Dezfouli A, S J Herbert (1992) Intensifying plant density response of corn with artificial shade. *Agron. J.* 84: 547-555.
- Jones G H (1992) *Plants and Microclimate. A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Second edition. Cambridge University Press. Cambridge, Great Britain. 428 pp.
- Karlen D L, C R Camp (1985) Row spacing, plant population and water management effects on corn in the Atlantic Coastal Plain. *Agr. J.* 77: 711-715.
- Kirkham M B, E L Smith (1984) Solar intensity on winter wheat leaves. *Field Crop Research* 8(4): 297-306
- Lee H S J y Griffiths H (1987) Induction and repression of CAM in *Sedum telephium* L. in response to photoperiod and water stress. *Journal of Experimental Botany* 38: 834-841.
- Maddoni G A, M E Otegui (1996) Leaf area, Light interception and crop development in maize. *Field Crop Res.* 48: 1, 87-87.
- Monteith J L (1981) Does light limit crop production? En: *Physiological Processes Limiting Plant Productivity* (Ed. por Johnson, C B) Butterworths, Londres Gran Bretaña. pp. 23-38
- Monteith J L, M H Unsworth (1990) *Principles of Environmental Physics*. Second edition, Chapman and Hall, Inc. London, United Kingdom. 291 p.
- Nobel P S (1983) *Biophysical Plant Physiology and Ecology*. W. H. Freeman and Company. New York, U.S.A. 608 pp.
- Nobel P S (1991a) *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. Academic Press, Inc. Los Angeles, Calif. pp: 345-392.
- Nobel P S (1991b) Achievable productivities of certain plants: basis for high values compared C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> plants. *New Phytologist* 119: 183-205.
- Nobel P S (1998) *Los incomparables agaves y cactus*. México. Trillas. 211pp.
- Nobel P S, T L Hartsock (1986) Environmental influences on the productivity of three desert succulents in the south-western United States. *Plant, Cell and Environment* 9:741-749

- Norman J M, T J Arkebauer (1991) Modeling crop photosynthesis from biochemistry to canopy. ASA and CSSA, Special Publication No 19. pp: 75-79.
- Otegui M E, M G Nicolini, R A Ruiz, P A Dodds (1995) Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron. J.* 87: 29-33.
- Ortiz S C A (1987) Elementos de agrometeorología cuantitativa. Depto. de Suelos. U.A.Ch, México. 327pp.
- Rosenberg N J, B L Blad, S D Verma (1983) Microclimate. The Biological Environment. John Wiley and Sons, Inc. New York. EUA 495 pp.
- Shibles R M, C R Weber (1965) Leaf area, solar radiation interception, and dry matter production by soybeans. *Crop Sci.* 5: 575- 578.
- Taiz L, E Zeigler (1998) Plant Physiology. Sinauer Associates, Inc., Publishers. USA. pp: 1-792.
- Torres R E (1995) Agrometeorología. Ed. Trillas. México. 154p.
- Wells R (1991) Soybean growth response to plant density: Relationships among canopy photosynthesis, leaf area and light interception. *Crop Sci.* 31: 755-761.
- Westgate M E, F Forcella, D C Reicosky, J Somsen (1997) Rapid canopy closure for maize production in the northern U S corn belt: Radiation use efficiency and grain yield. *Field Crop Res.* 49: 249-258.

## CONCLUSIONES GENERALES

Los días requeridos para el desarrollo de la yema floral desde la emergencia hasta la antesis en *Opuntia ficus-indica* cv. CP-Azteca fueron mayores en yemas tempranas, y se fueron reduciendo conforme la fecha de emergencia de la yema floral es más tardía. No obstante, el mismo desarrollo expresado en grados día acumulados fueron iguales en todas las fechas de emergencia de yemas

El método utilizado para el cálculo de los GDD presento gran consistencia

La duración en días de la apertura floral fue variable en las cuatro especies estudiadas (*Opuntia ficus-indica*, *O. amyclaea*, *O. robusta* y *O. streptacantha*) y parece estar relacionada con la precipitación acumulada en los tallos en ciclos anteriores

La humedad relativa del aire no influyó en el número de días de apertura floral

La cinética de la apertura floral indicó una relativa independencia del riego en el mismo ciclo de crecimiento y de la polinización

La inducción a la partenocarpia desarrollo frutos 100 % sin semilla cuya calidad fue superior a la de los frutos con semilla, además de que la cáscara del fruto partenocárpico tiene propiedades que la hacen comestible

La eficiencia en la conversión de RFA en biomasa fue mayor en condiciones de riego (1.94 %) que en temporal (1.27 %), pero la eficiencia en el uso del agua fue mayor en condiciones de temporal ( $1.49 \text{ kg}_{(\text{MS})} \text{ t}^{-1}_{(\text{agua})}$ ) que en riego ( $1.08 \text{ kg}_{(\text{MS})} \text{ t}^{-1}_{(\text{agua})}$ ).