

**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS  
AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

**FISIOLOGÍA VEGETAL**

**INDUCCIÓN DE PARTENOCARPIA  
EN *Opuntia* spp.**

VARELA DELGADILLO OSCAR EDUARDO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO


2016

La presente tesis titulada: **Inducción de partenocarpia en *Opuntia spp.***, realizada por el alumno: **Oscar Eduardo Varela Delgadillo** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS**  
**RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**  
**FISIOLOGÍA VEGETAL**

CONSEJO PARTICULAR


CONSEJERO



---

DR. MANUEL LIVERA MUÑOZ

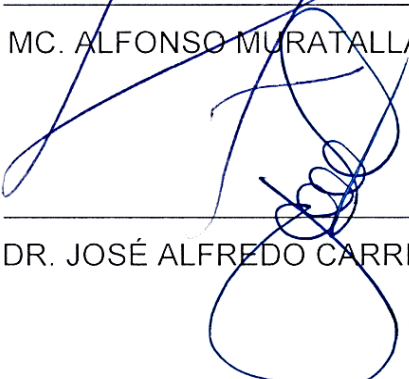
ASESOR



---

MC. ALFONSO MURATALLA LÚA

ASESOR



---

DR. JOSÉ ALFREDO CARRILLO SALAZAR

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Mayo del 2016

## **INDUCCIÓN DE PARTENOCARPIA EN *Opuntia* spp.**

**Oscar Eduardo Varela Delgadillo, M.C.**

**Colegio de Postgraduados, 2016**

### **RESUMEN**

La tuna es un fruto que posee cualidades apreciadas por los consumidores en México y otros países; sin embargo, algunas personas no la consumen porque tiene semillas grandes y numerosas en la pulpa, lo cual afecta su calidad y limita su aceptación en los mercados. El objetivo de esta investigación fue determinar si es posible producir frutos partenocárpicos de calidad en cuatro variedades de nopal de amplio uso por los productores en la región de Zacatecas y San Luis Potosí. Se aplicaron las dosis de 0, 50, 100 y 200 ppm de AG<sub>3</sub> a flores emasculadas en etapa de preantesis de las variedades Amarilla Montesa, Burrón, Cristalina y Rojo Pelón. A las flores testigos (0 ppm) se les dejó que se polinizaran libremente. La unidad experimental fue una flor y se hicieron 20 repeticiones. El diseño experimental fue un factorial con dos factores (variedad y dosis de AG<sub>3</sub>). Con las tres dosis de AG<sub>3</sub> se obtuvieron frutos partenocárpicos que redujeron significativamente su longitud, diámetro y peso de fruto; también redujeron peso de pulpa, relación pulpa/peso del fruto y grados Brix (°Bx) tanto de la pulpa como de la cáscara además se incrementó el grosor de la cáscara en comparación con los frutos provenientes de flores sin tratar (testigo). Aunque se obtuvieron frutos con poca pulpa y cáscara gruesa, esta última presenta °Bx similares a los de su pulpa.

**Palabras clave:** *Opuntia*, ácido giberélico, emasculación, partenocarpia, tuna.

## **PARTHENOCARPY INDUCTION IN *Opuntia* spp.**

**Oscar Eduardo Varela Delgadillo, M.C.**

**Colegio de Postgraduados, 2016**

### **ABSTRACT**

The cactus pear is a fruit with some characteristics appreciated by consumers in Mexico and other countries; however, some people do not consume it because it has numerous, hard and large seeds in the pulp, which greatly affect fruit quality and limit its acceptance in many markets. The objective of this research was to determine if it is possible to produce high quality parthenocarpic fruits in four varieties of nopal widely used by producers in the region of Zacatecas and San Luis Potosi. Doses of 0, 50, 100 and 200 ppm GA<sub>3</sub> were applied to emasculated flowers to produce parthenocarpic fruits in varieties Amarilla Montesa, Burrón, Cristalina and Rojo Pelón. Flowers were emasculated at preanthesis stage and three doses (50, 100, 200 ppm) of GA<sub>3</sub> were applied. Flowers used as checks (0 ppm) were left in open pollination. The experimental unit was a flower and 20 replications were made. The experimental design used was a factorial with two factors (variety and dosage of GA<sub>3</sub>). The three doses of GA<sub>3</sub> applied produced parthenocarpic fruits but with a significant reduction in fruit length, diameter and weight. Pulp weight, pulp/fruit weight ratio and °Brix in pulp and peel were also lower than in fruits with no GA<sub>3</sub> treatment; peel thickness increased with GA<sub>3</sub> treatment. Although parthenocarpic fruits had little pulp and thicker shell, the latter is had similar °Brix as in the pulp.

**Keywords:** *Opuntia*, gibberellic acid, emasculation, parthenocarpy, cactus pear.

## DEDICATORIA

*A mi familia por la formación, apoyo, cariño y comprensión que me han brindado. Además que entendieron mis ausencias, que a pesar de la distancia siempre estuvieron atentos para saber de mí en todo momento.*

*A mis compañeros y amigos por la amistad que significa mucho para mí.*

## AGRADECIMIENTOS

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de maestría.*

*Al colegio de Postgraduados por haberme brindado la oportunidad de seguir con mi formación académica.*

*Al programa de Fisiología Vegetal, al personal académico y administrativo y a todos mis maestros que aportaron a mi formación.*

*Al Dr. Manuel Lívera Muñoz por dirigir el presente trabajo y por todos sus consejos y conocimientos.*

*A mis asesores el M. C. Alfonso Muratalla Lua y Dr. José Alfredo Carrillo Salazar por la disponibilidad, sus aportaciones y acertadas sugerencias y valioso tiempo brindado para la culminación de este trabajo.*

*Al M.C Roberto Flores Almaraz por la ayuda ofrecida en la fase de campo de este trabajo.*

*A los señores Alberto Córdova, Concepción Alferes, Guadalupe Alferes por la facilidad brindada para llevar a cabo la fase experimental del presente trabajo en sus predios. También a Jorge Córdova por su disponibilidad y apoyo brindado al inicio de la investigación.*

*A Guillermo Alferes (Memo) y Antonino por su proactiva ayuda en la fase de campo. También a Carlos, Ricardo, Yurisel y Abimael por ayudar en la toma de datos.*

*A Emma por apoyarme y estar a mi lado durante el tiempo de escribir resultados de este trabajo.*

*A mis compañeros y amigos que hicieron más grata mi estancia en la maestría*

## CONTENIDO

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivo e hipótesis .....	3
<b>II.</b>	<b>REVISION DE LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
2.1	Importancia del nopal tunero .....	4
2.2	Descripción del fruto del nopal.....	10
2.3	Antecedentes de la tuna partenocárpica. ....	13
2.4	Tipos de partenocarpia.....	13
2.5	Partenocarpia en nopal tunero .....	16
<b>III.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
3.1	Inducción de partenocarpia in situ, en Zacatecas. ....	22
3.2	Descripción de los Cultivares estudiados .....	23
3.3	Características de las huertas .....	27
3.4	Diseño experimental y tratamientos.....	27
3.5	Cosecha de los frutos.....	29
3.6	Variables evaluadas.....	29
3.7	Análisis estadístico.....	30
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>32</b>
4.1	Factor Variedad .....	32
4.2	Factor Dosis .....	38
4.3	Interacción cultivares x concentraciones de AG <sub>3</sub> .....	43
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>50</b>
<b>VI.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>51</b>
<b>VII.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>56</b>

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1. Regiones productoras y caracterización de los principales sistemas de producción de tuna en México.....</b>	<b>6</b>
<b>Cuadro 2. Factores y niveles de estudio en el experimento .....</b>	<b>28</b>
<b>Cuadro 3. Efecto promedio de la variedad sobre el número de semillas y residuos seminales (RS) de cuatro variedades de tuna. ....</b>	<b>36</b>
<b>Cuadro 4. Promedios del número y peso de semillas por fruto de tunas normales (testigos) de cuatro variedades de nopal tunero.....</b>	<b>37</b>
<b>Cuadro 5. Efecto de tres concentraciones de AG<sub>3</sub> sobre el número y peso de semillas y número y peso de residuos seminales por fruto de cuatro cultivares de nopal tunero.....</b>	<b>42</b>
<b>Cuadro 6. Número promedio de semillas y residuos seminales por fruto en tunas normales y tunas partenocárpicas obtenidas con aplicación de tres dosis de AG<sub>3</sub> en cuatro variedades de nopal.....</b>	<b>48</b>
<b>Cuadro 7. Peso promedio de semillas y residuos seminales por fruto de tunas normales y tunas partenocárpicas obtenidas con aplicación de tres dosis de AG<sub>3</sub> en cuatro variedades de nopal. ....</b>	<b>48</b>
<b>Cuadro 8. Tamaño promedio de semilla y de residuo seminal proveniente de fruto normal y partenocárpico de cuatro variedades de nopal. ....</b>	<b>49</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1. Regiones productoras de tuna en México (Gallegos et al., 2009).</b> .....	5
<b>Figura 2. Producción de tuna en los estados de Puebla, Estado de México y Zacatecas en el periodo de 2004-2014 (Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2015).</b> .....	7
<b>Figura 3. Precio Medio Rural (PMR) por tonelada de tuna en los estados de Puebla, Estado de México y Zacatecas en el periodo de 2004-2014 (Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2015).</b> .....	8
<b>Figura 4. Producción de tuna en el municipio de Pinos, Zac., y la nacional para el periodo de 2004-2014 (Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2015)</b> .....	9
<b>Figura 5. Localización del experimento</b> .....	22
<b>Figura 6. Variedad Burrona</b> .....	23
<b>Figura 7. Variedad Cristalina</b> .....	24
<b>Figura 8. Variedad Amarilla Montesa o Amarilla Huesona</b> .....	25
<b>Figura 9. Variedad Rojo Pelón</b> .....	26
<b>Figura 10. Características de calidad del fruto de cuatro variedades de nopal tunero (barras con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05).</b>	33
<b>Figura 11. Características de calidad de fruto de cuatro variedades de nopal tunero (barras con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05).</b>	35
<b>Figura 12. Efecto de tres concentraciones de AG<sub>3</sub> sobre características de calidad de los frutos de cuatro cultivares de nopal tunero (barras con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05).</b> .....	39

<b>Figura 13. Efecto de tres concentraciones de AG<sub>3</sub> sobre características de calidad de los frutos de cuatro cultivares de nopal tunero (barras con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05).....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 14. Respuesta de características del fruto a diferentes concentraciones de ácido giberélico (AG<sub>3</sub>) en cuatro variedades (Cr=Cristalina, Br=Burrona, AM=Amarilla Montesa y RP=Rojo Pelón). .....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 15. Respuesta de características del fruto a diferentes concentraciones de ácido giberélico (AG<sub>3</sub>) en cuatro variedades (Cr=Cristalina, Br=Burrona, AM=Amarilla Montesa y RP=Rojo Pelón). .....</b>	<b>47</b>

## I. INTRODUCCIÓN

En México, las cactáceas son un recurso natural utilizado por sus habitantes desde tiempos prehispánicos (Bravo, 1978); entre ellas destacan los nopales del género *Opuntia*, que hasta la fecha son importantes por su aprovechamiento en una diversidad de usos: producción de verdura, frutos, forraje y uso medicinal, entre otros (Orona-Castillo *et al.*, 2003). México es considerado a nivel mundial la región de origen y dispersión primaria del nopal; debido a ello, representa el recurso vegetal más importante desde el punto de vista agroecológico, social y económico para los habitantes de las zonas áridas y semiáridas de nuestro país (Méndez *et al.*, 2008), donde la producción de su fruta es una alternativa importante, pues la mayor superficie cultivada con nopal tunero en 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-Juárez *et al.* 2009).

Los frutos de *Opuntia spp.* llamados tunas, son apreciados por su sabor agradable y aporte de fibra, hidrocoloides (mucilagos), pigmentos (betalaínas y carotenoides), minerales (calcio, potasio) vitaminas y azúcares (Sáenz-Hernández, 2004). Según ASERCA (2011), el consumo per cápita de tuna en México fue de 3.97, 4.74, 4.28 y 2.14 kg en las regiones Norte, Occidente, Centro y Sur.

Algunas personas no consumen tunas porque señalan que tienen gran cantidad de semillas en la pulpa (Corrales y Hernández, 2005) y que no es agradable tener que tragarlas. Las semillas viables son morfológicamente grandes y su presencia afecta en gran medida la calidad comercial y limita aceptación de las frutas en muchos mercados debido a la cubierta dura de la semilla (ElBehi *et al.*, 2015). El tamaño y número de éstas varía de 4.5 mm de largo, 3.5 mm de ancho y 1.6 mm de espesor y de 16 a 518 semillas por fruto (Aguilar *et al.*, 2003). Por lo anterior, desde hace décadas se ha intentado obtener frutos sin semilla, también llamados frutos partenocárpico. La partenocarpia es el desarrollo de un fruto sin la fertilización de los óvulos, y puede

obtenerse en genotipos particulares de algunas especies en forma natural o mediante partenocarpia artificial por aplicación de varios productos (Bangerth y Schröder, 1994).

En el caso del cultivo de nopal Weiss *et al.*, (1993) reportan un clon BS1 de *Opuntia ficus-indica* que presenta partenocarpia vegetativa, que no requiere de la polinización para el desarrollo y cuajado del fruto, así mismo, se puede obtener frutos sin semilla con aplicaciones externas de reguladores de crecimiento a flores antes y después de la anthesis, con diferentes métodos y épocas de aplicación, uno de los que más ampliamente se ha usado es el ácido giberélico ( $AG_3$ ) donde se han obtenido buenos resultados en concentraciones que van desde 50 ppm hasta 500 ppm (Gil *et al.*, 1977; Díaz y Gil, 1978; Gil y Espinosa, 1980; Ortiz Hernández, 1991; Mejía, 2003; Kaaniche-Elloumi *et al.*, 2015). En México y otros países se ha inducido la partenocarpia en nopal tunero por varios investigadores aplicando ácido giberélico; sin embargo, a la fecha no se encuentra ningún fruto partenocárpico de calidad en el mercado. Lo que posiblemente se deba a que la base genética utilizada para inducir la partenocarpia ha sido estrecha, utilizando principalmente *Opuntia ficus-indica*.

México cuenta con una amplia diversidad genética de nopal tunero; por ejemplo, solamente en la altiplanicie meridional se han registrado 126 cultivares, que corresponden a 18 especies (Reyes *et al.*, 2009). Los productores de nopal tunero están utilizando una amplia gama de variedades con frutos de distintos colores (blancas, amarillas, naranja, rojas y moradas, principalmente), con cualidades muy apreciadas en el mercado nacional y en el extranjero; en este último su demanda y comercialización se han incrementado sustancialmente, particularmente en Estados Unidos y Canadá (Gallegos y Mondragón, 2011), y que no son de la especie *O. ficus indica*, y que posiblemente algunas de ellas presenten una buena respuesta a la inducción de la partenocarpia con ácido giberélico.

## **1.1 Objetivo e hipótesis**

### **Objetivo:**

El objetivo de esta investigación es determinar si es posible producir frutos partenocárpicos de calidad en cuatro variedades de nopal de amplio uso por los productores en la región de Zacatecas y San Luis Potosí.

### **Hipótesis:**

Se pueden obtener frutos partenocárpicos de alta calidad en variedades de nopal tunero induciendo la partenocarpia con ácido giberélico.

## II. REVISION DE LITERATURA

### 2.1 Importancia del nopal tunero

El nopal del género *Opuntia* se encuentra ampliamente distribuido, motivo que ubica a México como el centro de origen y dispersión (Bravo, 1978).

Actualmente, el nopal tunero está establecido en México como la mejor opción de uso de tierras semiáridas, hecho de que el país posea vastas zonas con clima semiárido combinado con la aptitud fisiológica del nopal para producir en ellas, permitió que este dejara su condición de frutal de solar y consumo local típicos de mediados del siglo pasado, convirtiéndose en cultivo de alternativa para zonas alta siniestralidad tradicionalmente sembradas de maíz y frijol de durante las décadas de 1970 a 2000 (Mondragón, 2013).

Se ha estimado que alrededor de 20,000 familias obtienen ingresos de alguna actividad con la tuna (Méndez y García, 2006), aunque la mayoría de ellas viven en los límites de la pobreza. Debido al hábito perenne del nopal en regiones de alta migración, su cultivo ha ayudado a reducirla (Gallegos *et al.*, 2003).

Existen tres regiones productoras de tuna en México, de acuerdo con las condiciones de suelo, clima, nivel tecnológico y proximidad con la ciudad de México, el mercado nacional más importante del país (Figura 1). La región Centro Norte se localiza en las confluencias del Sureste de Zacatecas, porciones del Altiplano potosino, Oriente de Aguascalientes, Norte de Guanajuato, Jalisco y Querétaro; la región Central incluye los municipios del oriente del Estado de México, Tlaxcala e Hidalgo; y la región Sur representada por el estado de Puebla. Existen plantaciones dispersas en los estados de Durango, Coahuila, Nuevo León, Oaxaca, Veracruz, Tamaulipas, Morelos, Michoacán, Baja California Norte Sistemas de producción (Gallegos *et al.*, 2003).



**Figura 1. Regiones productoras de tuna en México (Gallegos *et al.*, 2009).**

Las tres regiones se distinguen por presentar diferentes características tecnológicas para la producción de tuna. La región Centro Norte presenta un sistema de producción extensivo de temporal con capital limitado en zonas susceptibles a heladas y en tierras semiáridas. La región Central es semi-intensiva de temporal, de alta inversión, en áreas susceptibles a heladas con clima sub-húmedo en tierras semiáridas de buena calidad y la región Sur es intensiva, de temporal, de alta inversión y con bajo riesgo de heladas y clima sub-húmedo en suelos de primera y segunda clase, en el cuadro 1 se resume las características de cada región.

Las estadísticas oficiales (SIAP, 2015) muestran que la producción total nacional de tuna para el año 2014 alcanzó 568,404 toneladas obtenidas en 55,254 ha de plantaciones comerciales (Cuadro 1), con un valor de la producción de \$1'626,573 distribuidos en tres regiones productoras, Centro Norte, Centro y Sur.

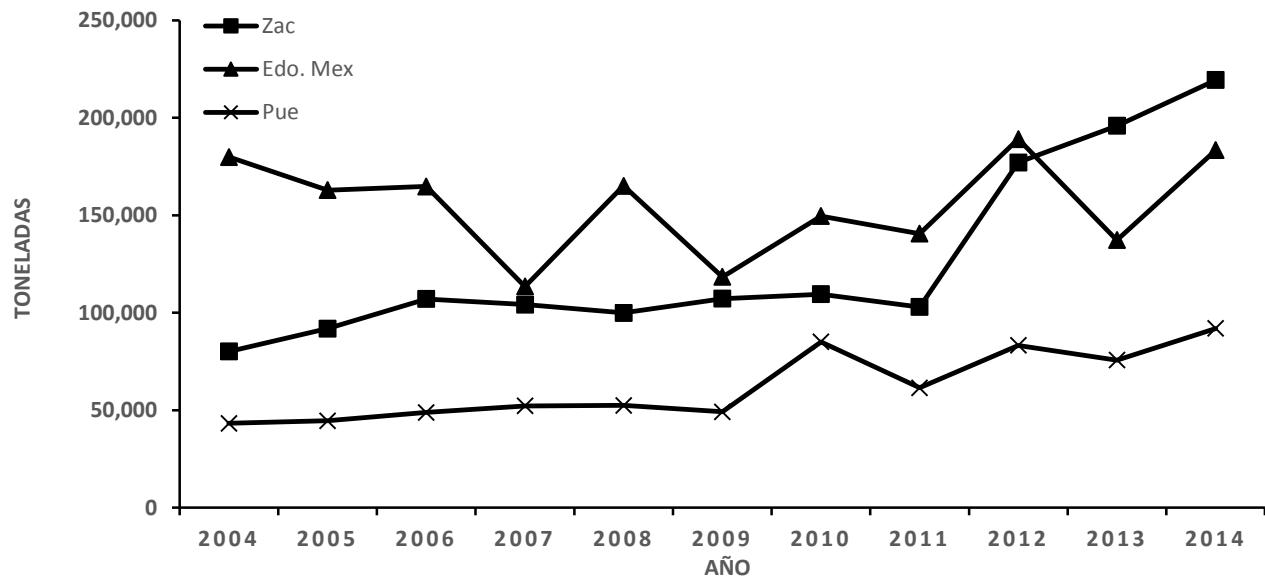
**Cuadro 1. Regiones productoras y caracterización de los principales sistemas de producción de tuna en México**

REGIÓN Y ESTADO	CLIMA		SISTEMAS DE PRODUCCIÓN		SUPERFICIE Y PRODUCCIÓN (para el año 2014)*		
	Temperatura anual promedio (°C) y periodo de heladas	Precipitación anual promedio (mm)	Variedades y época de cosecha	Sistema de producción	Superficie plantada (ha)	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)
<b>Centro Norte</b>							
Zacatecas	15 -20 Octubre- Marzo	350 – 500	Julio - Octubre Burróna Cristalina Roja Lisa Montesa Pico chulo Torreaja Gavia	Temporal extensivo, baja densidad (400 a 600 plantas/ha), Manejo limitado a intermedio, bajos insumos, mecanizado	18,201.90	12.46	219,383.59
San Luis Potosí					3,085.00	7.22	13,483.73
Jalisco					2,159.00	3.14	6,757.00
Guanajuato					1,784.00	12.22	55,239.70
Aguascalientes					647.00	3.37	2,178.45
Querétaro					500	2.32	1,005.61
				<b>Subtotal</b>	26,376.9	6.79	264,606.68
<b>Central</b>							
México	16 – 18 Noviembre-Enero	500 – 700	Julio - Septiembre Reyna Roja San Martín Xoconostle	Temporal semi- intensivo 525 a 825 plantas /ha, Manejo intensivo e insumos, bajo uso de maquinaria	16,986.00	10.8	183,458.87
Hidalgo					5,154.00	5.74	25,915.25
Tlaxcala					22	4.00	88
				<b>Subtotal</b>	22,162.00	6.85	209,462.12
<b>Sur</b>							
Puebla	15 – 17 Diciembre-enero	600 – 800	Abril - Octubre Criolla Reyna Cristalina Roja San Martín	Temporal intensivo; 450 a 3,300 plantas/ha, manejo intensivo e insumos, bajo uso de maquinaria	4,937.00	18.99	91,984.80
Otros estados					1,778.10	2.6	2,351.30
				<b>TOTAL NACIONAL</b>	55,254.00	11.02	568,404.90

Fuente: Gallegos y Mondragón (2011), y modificado por Varela con cifras del SIAP (2015).

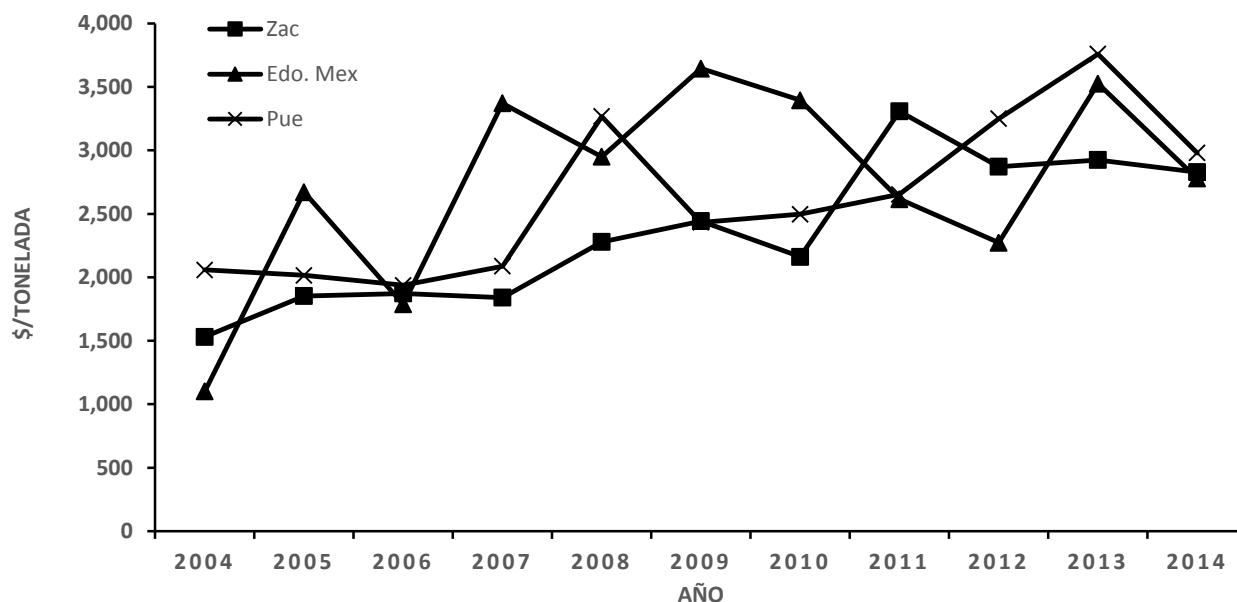


Zacatecas, Estado de México y Puebla son los tres principales productores de tuna en México representando el 86 % de la producción nacional de tuna (494,827 toneladas) y el 86 % del valor generado por esta fruta (1404.3 millones de pesos) (Figura 2).



**Figura 2. Producción de tuna en los estados de Puebla, Estado de México y Zacatecas en el periodo de 2004-2014 (Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2015).**

El precio medio rural nacional que la tuna alcanzó en el año 2014, \$2,861.65 por tonelada, fue el doble de precio que alcanzó en el año 2004, que fue de \$1,414.81 por tonelada. El Estado de México alcanzó en 2014 un precio medio rural de \$2,778.23 por tonelada, en tanto que Zacatecas y Puebla presentaron precios de \$2,828.54 y \$2,979.97 por tonelada, respectivamente (Figura 3).



**Figura 3. Precio Medio Rural (PMR) por tonelada de tuna en los estados de Puebla, Estado de México y Zacatecas en el periodo de 2004-2014 (Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2015).**

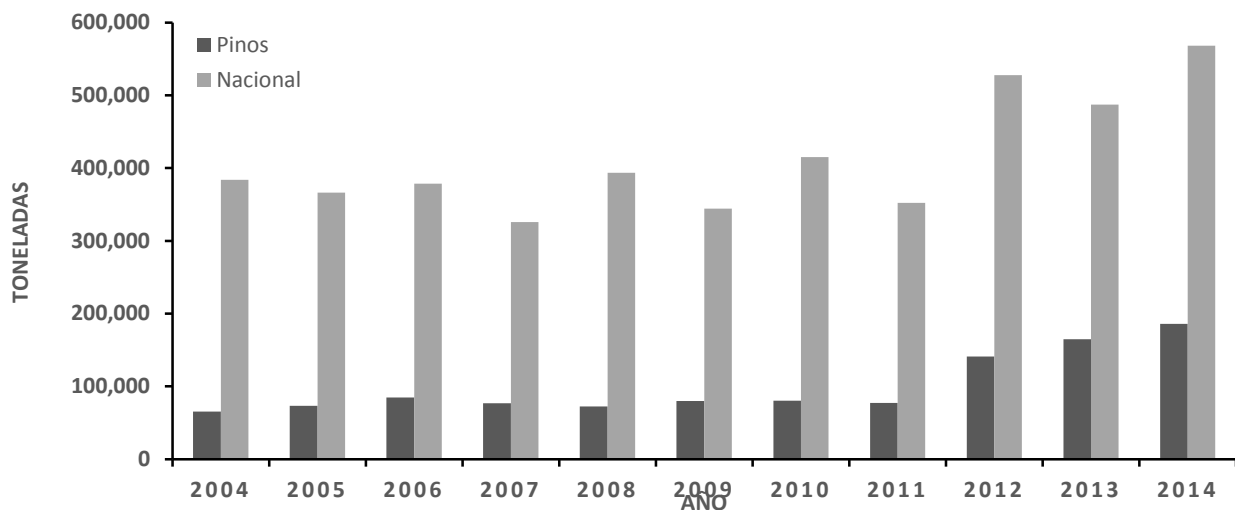
En el estado de Zacatecas el nopal tunero como cultivo comercial es de gran importancia económica, ya que es una de las pocas opciones de reconversión productiva para el semidesierto.

La superficie dedicada a este cultivo en Zacatecas es de 18, 201 hectáreas, de las cuales 3 % se cultivan bajo condiciones de riego y 97 % en temporal, respectivamente (SIAP, 2015).

Las áreas productoras se ubican en el sureste del estado. Los municipios de mayor importancia en la producción de tuna, son: Noria de Ángeles, Villa González, Villa García, Genaro Codina, Ojo Caliente y Pinos, con 2.2 %, 2.5 %, 2.6 %, 5 % y 74.5 %, respectivamente, donde producen el 90 % de la tuna en el estado; el resto de la superficie se encuentran dispersa en otros municipios de la entidad.

El municipio de Pinos sobresale en la producción de tuna en el estado de Zacatecas con 74.5 %, y a nivel nacional con el 32.7 % en el año 2014, es decir, tres cuartas partes de lo que se produce en el estado de Zacatecas las produce el municipio de Pinos y esta

producción representa un tercio del total de lo que se produce en el país (Figura 4), contribuyendo con un valor 537.8 millones de pesos de los 1,626.5 del promedio nacional (SIAP, 2015).



**Figura 4. Producción de tuna en el municipio de Pinos, Zac., y la nacional para el periodo de 2004-2014 (Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2015)**

En la región sureste de Zacatecas, se produce en un ambiente caracterizado por una precipitación pluvial limitada (media anual entre 360 a 440 mm) y presencia de heladas de octubre a marzo, lo cual condiciona la incorporación de tecnología para aumentar los rendimientos. Pese a ello, la producción de tuna se ha afianzado como una mejor alternativa que los cultivos tradicionales, constituyéndose en uno de los ejes más importantes de la economía regional (Gallegos *et al.*, 2003).

El mercado internacional de la tuna está restringido a nichos de consumidores con características sociales y culturales bien definidas, son los que muestran una gran lealtad hacia los productos tradicionales de sus países de origen. Particularmente, en los Estados Unidos (en las ciudades de San Antonio, Chicago, Los Ángeles, Miami y Nueva York) y Canadá (en Montreal, Toronto, Edmonton y Vancouver), la demanda de productos típicos o tradicionales, como la tuna, se focaliza en los consumidores mexicanos, latinoamericanos y europeos de origen latino (Méndez y García, 2006).

La tuna es un fruto que posee una amplia gama de propiedades funcionales, pero no tiene grandes opciones agroindustriales, aplicaciones y usos diferentes al consumo en fresco conocidos. Posee actividad antioxidante, sobre todo las rojas tienen una fuerte actividad antioxidante debido a su contenido de pectina, carotenos, betalaínas, ácido ascórbico y minerales (Sáenz-Hernández, 2004). Además, la tuna tiene un sabor muy peculiar y un costo muy bajo, cualidades que la convierten en un producto incomparable en el mercado mexicano considerando la relación costo-beneficio (ASERCA, 2011). A pesar de sus características organolépticas, la tuna no ha sido siempre bien aceptada ni apreciada, debido al desconocimiento de sus propiedades nutricionales, funcionales y medicinales, a la presencia de ahuates (espinas deciduas, delgadas y cortas) y de semillas grandes y numerosas, así como a su consumo se ha asociado a la penuria y a las clases bajas, entre otras (Méndez y García, 2013).

El nopal es una de las especies vegetales que mejor aprovecha el agua. Tiene varias adaptaciones morfológicas y fisiológicas que le permiten sobrevivir a las condiciones adversas que prevalecen en las regiones semiáridas. Una de ellas es el sistema de raíz superficial, característica que le permite el aprovechamiento rápido de las lluvias de baja intensidad y cantidad. El nopal puede formar raíces nuevas absorbentes dentro de las 24 horas posteriores al humedecimiento del suelo, lo que contribuye a que sea una planta altamente eficiente en el uso del agua y convertirla en materia seca (Luna, 2012).

## **2.2 Descripción del fruto del nopal**

El fruto del nopal tunero es considerado botánicamente como una baya unilocular, polispérmica y carnosa de forma ovoide o esférica, espinosa, cuyas dimensiones y color varía según la especie, que se origina de una flor con ovario ínfero (Bravo, 1978), cuyos óvulos están dispuestos en una placentación parietal (Pimienta y Engleman, 1985); sus dimensiones y coloraciones pueden variar según la especie, encontrándose frutos de 4 a 12 cm o más de longitud, de color amarillo canario, amarillo limón, anaranjado, rojo, guindo, rojo-morado, verde tierno, blanco verdoso (Nieto-Garibay, 2003).

El fruto se compone de tres estructuras que determinan su calidad:

**La cáscara.** Que corresponde a la parte no comestible del fruto, por lo que a menor peso de esta, mayor será la calidad del fruto (Sudzuki *et al.*, 1993). Piga (2004) reporta que en frutos de *Opuntia ficus-indica* a madurez comercial, la cáscara (pericarpio) representa el 33 a 55 %. El receptáculo que rodea al ovario da origen a la cáscara en el fruto maduro y la cáscara como el cladodio presenta los mismos tejidos (Pimienta y Engleman, 1985). Durante la primera semana después de floración es mayor el crecimiento de la cáscara que el del tejido que origina la pulpa, situación que luego se revierte y el lóculo empieza a expandirse, especialmente en los últimos 30 días del desarrollo del fruto, por lo que es fundamental el aporte hídrico en esta etapa (Sudzuki *et al.*, 1993).

Alvarado (1978) estudió el comportamiento en desarrollo de la cáscara y la pulpa en *Opuntia amyclaea*, el momento del amarre la cáscara representa 95 % del peso, mientras que la pulpa solo el 5 %. En la cuarta semana la cáscara representa 76.6 % y aumenta ligeramente durante las siguientes tres semanas para finalmente disminuir hasta un valor de 36%. La pulpa aumenta su volumen durante las primeras cuatro semanas a partir de la floración y sus semillas son blandas, blancas y apelmazadas; en la quinta semana las semillas empiezan a manifestar un endurecimiento y cambian su color de blanco a tientes negruzcos, pasando por amarillentos y cafés; en la octava semana alrededor de la semilla se presenta una capa delgada de tejido transparente, resultado del engrosamiento de los funículos; en la onceava semana se presenta un tejido que separa a las semillas, que aumenta en las últimas semanas de desarrollo del fruto y constituye la pulpa.

El mismo autor, señala que el crecimiento en longitud y diámetro del fruto es proporcional y presenta una tendencia lineal durante las primeras doce semanas; posteriormente se incrementa sobretodo el diámetro, debido a la acumulación de reservas y aumento en el peso de las semillas.

**La pulpa.** La pulpa está formada por células de parénquima que se originan en la epidermis dorsal de la envoltura funicular. Las células epidérmicas de envoltura funicular

empieza a formar papilas, de dos a cinco días después de la apertura floral y ya cerca de la madurez del fruto, las células internas de la envoltura funicular engruesan sus paredes dando origen a una cubierta endurecida (lignificada), además de la cubierta seminal; sin embargo, la envoltura funicular contribuye con el 90 % de la parte comestible y el funículo con solo 10 %; las semillas abortivas también logran formar una envoltura funicular carnosa, semejante a la que se forma a partir de las semillas normales (Pimienta y Engleman, 1985).

**Las semillas.** Las semillas del género *Opuntia* son pequeñas y ovoides o de forma lenticular (Bravo, 1978). En *O. ficus-indica* la cantidad de semilla puede variar de 30 % a 40 % sobre una base de peso seco y su pericarpio corresponde a 90-95 % de toda la semilla (Habibi *et al.*, 2008). En *Opuntia* se encontró que los cultivares de frutas con diferentes grados de domesticación y plantas silvestres que crecen en las tierras altas meridionales de México tienen entre 16-518 semillas por fruto, con 0 a 98 % de semillas abortivas y de 4.5 mm de largo, 3.5 mm de ancho y 1.6 mm de espesor (Aguilar *et al.*, 2003). Una de las características más importantes que presenta la semilla abortiva, que tiene menor volumen que una normal, es que su envoltura funicular es capaz de desarrollar pulpa, al igual que la envoltura de semillas normales. En un fruto maduro las semillas abortivas se distinguen por su tamaño pequeño y color café claro, en contraste con las semillas normales que son de mayor tamaño y de color oscuro, esto sugiere que en frutos con mayor proporción de semillas abortivas se tendrá un volumen mayor ocupado por la parte comestible (Pimienta, 1990). Se han encontrado correlaciones positivas entre el contenido de semillas (número y peso) y el peso total de la fruta, indicando que el mayor tamaño de la fruta está relacionado con el mayor número de semillas (Barbera *et al.*, 1994) ya que las semillas con embrión son de mayor tamaño y producen mayor cantidad de hormonas y pulpa (Gil *et al.*, 1977).

### **2.3 Antecedentes de la tuna partenocárpica.**

Los procesos de polinización y fecundación resultan en la formación de semillas, las cuales tienen una función importante en el cuajado de frutos. Sin embargo, no todas las especies ni todos los cultivares dentro de las especies de frutales tienen la necesidad absoluta de que sus flores sean polinizadas, fecundadas y que contengan semillas para amarrar y desarrollar el fruto. El fenómeno de cuajado y crecimiento de fruto sin la presencia de semillas se le conoce como partenocarpia (Díaz, 2002).

Diversos investigadores alrededor del mundo han tratado de reducir las semillas de la tuna (*Opuntia ficus-indica*), incluso eliminarlas. Entre ellos están, Díaz y Gil (1978), Gil y Espinosa (1980) en Chile; en México; Mejía (1986), Ortiz Hernández (1988) y Rodríguez y Cano (2002). Corrales y Flores (2003) señalan que en los años setenta en México, el Dr. Facundo Barrientos Pérez, realizó los primeros trabajos, que continuó el Dr. Jorge Rodríguez Alcázar y posteriormente el Dr. Manuel Livera Muñoz y el M.C. Alfonso Muratalla Lúa, y que en la UNAM investigaron en este tema la M.C. Hilda Carina Gómez Villar y el M.C. José Arnulfo Flores Valdez.

### **2.4 Tipos de partenocarpia**

La partenocarpia es el desarrollo de un fruto sin la fertilización de los óvulos, y puede obtenerse en genotipos particulares de algunas especies en forma natural o mediante partenocarpia artificial por aplicación de varios productos (Bangerth y Schröder, 1994).

**Partenocarpia natural o vegetativa.** Es aquella donde no se requiere de polinización (y por lo tanto tampoco de fecundación) para el cuajado y desarrollo del fruto (Díaz, 2002; Almaguer, 1998).

**Partenocarpia estimulativa.** Es aquella donde las flores requieren de polinización pero no de fecundación, para amarrar y desarrollar el fruto (Díaz, 2002; Agustí, 2008). En la partenocarpia estimulativa, la liberación de auxinas por enzimas del polen y tubo polínico, es suficiente para provocar el desarrollo del fruto (Almaguer, 1998).

**Estenospermocarpia.** Las flores son polinizadas y hay fecundación pero se aborta el cigoto recién formado, resultando en frutos sin semilla como la uva (Díaz, 2002, Almaguer, 1998).

### **Partenocarpia inducida por la aplicación de hormonas o reguladores de crecimiento**

Ciertas hormonas o reguladores de crecimiento son capaces de inducir la cuaja de frutos sin que haya una polinización y fertilización previa. Las hormonas que permiten la ocurrencia de este fenómeno son principalmente auxinas y giberelinas (Agustí, 2000).

La regulación del crecimiento de los frutos depende, en gran medida, de las hormonas sintetizadas en las semillas y, en particular, de las giberelinas, que pone en manifiesto que las giberelinas producidas en las semillas regulan el crecimiento del fruto. En guisante, la pera, la fresa y el tomate por ejemplo, la aplicación de AG<sub>3</sub> a frutos no polinizados suple el efecto de la polinización y de las semillas y estimula el crecimiento partenocárpico del fruto (Iglesias y Talón, 2008), cuando mediante la emasculación se impide la formación de semillas, el contenido de giberelinas de los frutos es menor que en aquellos que han desarrollado semillas normalmente (Agustí, 2008).

Los frutos partenocárpicos que se desarrollan de forma natural contienen niveles de giberelinas mayores o similares a los de los frutos con semillas, lo que explica su tendencia a cuajar en ausencia de polinización o fertilización, esto ha quedado demostrado en peras, manzanas, cítricos, arándanos, uvas, higos, fresas, etc., en estas especies es por tanto las giberelinas que controlan la partenocarpia y el desarrollo inicial del fruto, ello queda ratificado al menos por tres observaciones: 1) la aplicación de inhibidores de la biosíntesis de giberelinas inhibe, a su vez, partenocarpia; 2) el número de frutos partenocárpicos es prácticamente nulo en mutantes de *Arabidopsis* y tomate incapaces de sintetizar giberelinas; en ello, la aplicación de giberelinas exógenas antes de la polinización provoca la partenocarpia; 3) la aplicación exógena de ácido giberélico a variedades autoincompatibles de mandarina o a plantaciones de manzanos o perales



con dificultades de polinización aumenta notablemente la cosecha compuesta por frutos mayormente sin semilla (Agustí, 2008).

Por otro lado, los frutos, genéticamente partenocárpicos, como es el caso de los cítricos, contienen niveles de giberelinas normales. Esta observación indica que, en los frutos sin semilla, el factor responsable de la partenocarpia estimula la presencia de niveles de giberelinas relativamente altos en los tejidos de los ovarios, induciendo el desarrollo del fruto en ausencia de polinización o fertilización (Iglesias y Talón, 2008).

La sensibilidad de las células a las hormonas desempeña un papel importante en el control del desarrollo. La sensibilidad varía con el genotipo, el tejido, la edad y la fase de desarrollo de la planta, las condiciones ambientales y la presencia o ausencia de otras hormonas (Segura, 2008).

Para que las hormonas vegetales presentes en concentraciones muy pequeñas sean activas y específicas, deben darse también tres condiciones en el sistema de respuesta. Primero debe haber suficiente cantidad de hormona en las células adecuadas. Segundo cada uno de los grupos de células que responden a la hormona (las células destino) debe reconocerla y ligarse estrechamente a ella. Las moléculas proteicas poseen las estructuras complejas necesarias para reconocer y seleccionar moléculas mucho más pequeñas, tales proteínas se denominan proteínas receptoras (primeros mensajeros). En tercer lugar, la proteína receptora (cuya configuración cambia durante la captura de la hormona) debe causar algún otro cambio metabólico (respuesta) que conduzca a la amplificación de mensajero o la señal hormonal (transducción), de hecho, pueden tener lugar sucesivamente varios procesos de amplificación, antes de que se produzca la respuesta a la hormona (Salisbury y Ross, 2000).

En conjunto de los tres procesos constituye la denominada cadena de percepción y transducción de la señal o ruta de señalización, que requiere el reconocimiento del primer mensajero por un receptor y la utilización subsiguiente de una serie de moléculas

(segundos mensajeros o proteínas efectoras), capaces de transmitir la señal que activará la respuesta (Segura, 2008).

## **2.5 Partenocarpia en nopal tunero**

Corrales y Flores (2003) consideran tres alternativas para obtener tuna sin semilla:

1. Partir de variedades sin semilla, que generalmente no son tuneras, y mediante mejoramiento genético, por cruzamiento con variedades tuneras, y buscar obtener la tuna sin semilla, proceso que llevaría años y en el que no se puede garantizar el éxito.
2. Tuna transgénica. Se ha localizado un gen denominado *Killer seed* (asesino de semillas) que si se implantara en las variedades de tuna comerciales se produciría tuna sin semilla, con los inconvenientes del caso.
3. Producción de tuna sin semilla mediante la aplicación de hormonas. Señalan que este método es el que presenta mayores avances en México y que no se han obtenido tunas partenocárpicas de calidad porque se han cometido errores en cuanto al momento de la aplicación de las hormonas, calidad de las mismas, y forma de aplicación.

Se han realizado investigaciones sobre la inducción de frutos partenocárpicos usando reguladores de crecimiento en una amplia variedad de cultivos hortícolas, ya sea para estudiar el desarrollo de fruta o para incrementar la producción.

La actividad hormonal se ha explicado a través de la acción que ejercen algunas sustancias (hormonas) sobre la expresión de la información genética, la actividad enzimática y la funcionalidad de las membranas. El resultado final es consecuencia de la interacción entre todas ellas, unas promoviendo procesos y otras inhibiéndolos y se traduce en la regulación del desarrollo (reguladores del desarrollo). En el caso de los

frutos, dicho resultado depende también de la biosíntesis de diversas hormonas por el propio fruto. En la mayor parte de los casos, las hormonas se sintetizan en las semillas y ejercen su acción a través del desarrollo de éstas. La excepción más notable son los frutos partenocárpicos, cuyo desarrollo también está regulado hormonalmente (Agustí, 2008).

El nopal tiene absoluta dependencia de la polinización y formación de semillas para el desarrollo del fruto, pero el ácido giberélico (AG<sub>3</sub>) exógeno es capaz de remplazar al polen y, en parte a la semilla en su efecto estimulante del tejido del fruto (Gil *et al.*, 1977).

Los mismos autores demostraron que con el suministro externo de AG<sub>3</sub> la parte comestible nunca se desarrolló en forma normal en los frutos partenocárpicos. En el primer ensayo realizado el tamaño llegó a ser 42 y 58 % del fruto del testigo, y en otro no pasó de 65 %; se estimuló más la cáscara (exocarpio y mesocarpio) que el endocarpio. Los autores mencionan dos hipótesis: 1) que existió una mala absorción y translocación del AG<sub>3</sub>, estimulándose más los tejidos cercanos a la aplicación y 2) o que el endocarpio fue menos sensible al AG<sub>3</sub>; concluyendo que era más apropiada la primera hipótesis, debido a que la tuna posee una superficie bastante impermeable, siendo que otras bayas, como la uva, responde bien al AG<sub>3</sub>.

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* y concluyeron que es posible obtener frutos de tuna partenocárpicos de tamaño normal con una aspersion floral en antesis con AG<sub>3</sub> en dosis de 500 ppm o con tres aplicaciones de 100 ppm en antesis, 22 y 42 días después de la antesis o de mayor tamaño si se aplica tres veces la dosis de 500 ppm. También estudiaron, métodos de aplicación del AG<sub>3</sub>, con pasta de lanolina con 1 % de AG<sub>3</sub> o inyectando a la cavidad ovárica 1 mL de solución con 50 ppm para obtener frutos partenocárpicos normales. Sin embargo, los frutos partenocárpicos resultaron, con menos pulpa, con menor tamaño y, con falsas semillas con integumentos endurecidos, frutos elongados con bajo contenido de sólidos solubles.

Gil y Espinosa (1980) hicieron aspersiones de AG<sub>3</sub> en flores emasculadas 36 ó 15 días después de la antesis (DDA) seguidas de otras dos después de la antesis y provocaron el crecimiento partenocárpico sostenido de frutos. Este efecto fue más notable con la dosis de 500 ppm aplicada 15 DDA en cuyo caso los frutos alcanzaron un peso y un desarrollo de su parte comestible similar a los testigos. Cuando no existieron semillas, el AG<sub>3</sub> exógeno estimuló el tejido ovárico para que se desarrollara totalmente, aunque el problema de las falsas semillas endurecidas continuó presentándose.

Mejía y Cantwell (2003) reportan un estudio realizado en 1985 resumido en parte como tesis profesional (Mejía, 1986) para inducir partenocarpia en *Opuntia amyclaea* mediante la aplicación de ácido giberélico a yemas florales intactas y emasculadas llegando a la conclusión que es posible obtener frutos partenocárpicos pero estos resultaron con tamaño reducido y poco desarrollo de la pulpa.

Aguilar (1987) también trabajó con *Opuntia amyclaea* quien estudió el efecto combinado del AG<sub>3</sub> y de la urea logrando obtener frutos con ausencia total de semillas con una sola aplicación de la mezcla (500 ppm de AG<sub>3</sub> y 1.5 % de urea) a brotes emasculados 10 días antes de la floración, pero la calidad del fruto fue afectada por bajo peso del fruto sin cáscara, disminución del crecimiento en longitud, disminución de los grados Brix y sin alcanzar la madurez.

Ortiz (1988) hizo notar que son muchos los factores internos y externos que regulan el desarrollo del fruto, particularmente señaló que todas las categorías de las hormonas vegetales influyen sobre este proceso y que las aplicaciones de giberelinas y/o auxinas pueden promover el amarre de frutos partenocárpicos, aparentemente remplazando el efecto de la polinización y/o fecundación en el desarrollo del ovulo. La misma autora indicó que las aspersiones de giberelinas en plena floración pueden reducir el número de semillas y concluyó que las aplicaciones de AG<sub>3</sub> y/o auxinas 15 días antes de antesis, más otra aplicación durante la antesis incrementaron los sólidos solubles totales (grados Brix) y el peso del fruto, de la pulpa y la semilla. En las flores intactas hubo mayores respuestas que en las emasculadas. Además que las aspersiones de AG<sub>3</sub> 15 días antes

de la antesis y durante la antesis sobre flores emasculadas provocarobn el crecimiento de frutos partenocárpicos de mayor tamaño que los normales; sobre flores intactas, incrementando el contenido de semillas abortivas de tamaño reducido.

Ortiz *et al.* (1991) asperjaron ácido naftalenacético (ANA), ácido indolbutirico (AIB) y ácido giberélico (AG<sub>3</sub>) en flores emasculadas en *Opuntia amyclaea* 15 días antes de la antesis y durante la floración; con 300 ppm de AG<sub>3</sub>, 50 ppm de ANA + 500 ppm de AG<sub>3</sub> y con 10 ppm de AIB + 500 ppm de AG<sub>3</sub> incrementaron el peso del fruto en 12 %, 35 % y 35 %, respectivamente y el contenido de pulpa en 20 %, 15 % y 17 % más que el testigo (sin emasculas); sin embargo, en todos los casos hubo presencia de falsas semillas formadas con los integumentos ovulares lignificados. Los tratamientos con 300 mgL<sup>-1</sup> de AG<sub>3</sub> y 500 mgL<sup>-1</sup> de AG<sub>3</sub> incrementaron hasta 3.5 veces el número de semillas abortivas, siendo estas de menor tamaño que las del fruto proveniente de flor sin emasculas, y los tratamientos con ANA + AG<sub>3</sub> redujeron de 60 % a 84 % el número de semillas normales, e incrementaron hasta 4.5 veces el de las abortivas.

Pimienta (1990) señaló que en *Opuntia* no se puede producir frutos partenocárpicos al considerar que la pulpa se forma a partir de la cubierta funicular de los óvulos. Sin embargo, no consideró la posibilidad de que la partenogénesis autónoma se presenta cuando se observa partenocarpia en ausencia de cualquier estímulo, y Weiss *et al.*, (1993) demostraron que el cultivar israelí BS1 un mutante natural de *Opuntia ficus-indica* produce frutos partenocárpicos, es decir, que la polinización no es necesaria para el cuajado y desarrollo del fruto pero estos presentaron semillas degeneradas y lignificadas.

Rodríguez y Cano (IMPI, 2002), reportan un procedimiento para obtener frutos partenocárpicos que consiste en evitar la polinización mediante la eliminación del estigma, que llamaron “astigmatomía”, seguido de la aplicación de una formulación de giberelinas, citocininas, surfactantes y urea. La época de aplicación varía entre 0 y 35 días después de la astigmatización y el número de aplicaciones varía entre 1 y 3 por flor. Sin embargo, Hernández (2009) menciona que la producción de frutos partenocárpicos con este método tiene problemas como son la formación parcial de semillas y la

producción de frutos de tamaño pequeño, además que el método es caro por el número de aplicaciones repetidas que se tienen que hacer a cada flor para incrementar el tamaño.

Corrales y Hernández (2005) en seis variedades de nopal emascularon flores 2 días antes de su apertura y enseguida asperjaron una mezcla de una solución acuosa de ácido indolbutírico a  $300 \text{ mg L}^{-1}$  y una solución acuosa de ácido giberélico a  $150 \text{ mg L}^{-1}$  e hicieron aplicaciones subsecuentes (a los 15 y 30 días) de ácido giberélico ( $150 \text{ mg L}^{-1}$ ). Las tunas sin semilla en general presentaron menor peso de fruto en las variedades Amarilla 3389 y Naranjona. Los frutos más pesados fueron los de Cristalina, independientemente de la presencia de semillas. La falta de semillas y el AG<sub>3</sub> también redujeron la relación pulpa/cáscara en todas las variedades, excepto en Amarilla 2289. Otros efectos de la falta de semillas y del AG<sub>3</sub> fueron mayor grosor de cáscara (significativo en todas las variedades, excepto en Amarilla Milpa Alta y la ausencia de semilla no tuvo efectos significativos sobre los sólidos solubles totales.

López (2006) encontró que en tunas del cv. CP-Azteca (*O. ficus-indica*) sin semilla obtenidas con partenocarpia inducida no se afectó el patrón de crecimiento, se retrasó 7 días la madurez de consumo, y se incrementó el grosor de la cáscara; además ésta fue tan dulce como su respectiva pulpa y también se prolongó la vida de anaquel.

Hernández (2009) también trabajó con el cv. CP-Azteca, donde los frutos con inducción de partenocarpia resultaron 100 % sin semilla; pero con menor tamaño, peso y contenido de fibra que los frutos normales, También encontró que las características de la pulpa de los frutos partenocárpicos en relación a sólidos solubles totales, acidez titulable, contenido de azúcares totales y reductores, ácido ascórbico y contenido calórico son similares a los de frutos con semilla, subrayando que la cáscara tiene propiedades que la hacen comestible; por lo tanto, concluye que la calidad de los frutos partenocárpicos es superior y que su cáscara comestible compensa la reducción del peso de la pulpa en el fruto partenocárpico.

Más recientemente. Kaaniche-Elloumi *et al.*, (2015) estimularon la expresión de la apomixis natural de un clon de *Opuntia ficus-indica* mediante la aplicación de AG<sub>3</sub> en flores emasculadas antes de la antesis para mejorar la embriogénesis somática *in vitro* de embriones inmaduros y para producir frutos partenocárpicos. Las frutas obtenidas de flores emasculadas y tratadas mostraron una reducción relativa del tamaño y contenido de semillas vanas con tegumentos persistente en comparación con el testigo. Sin embargo, tratamiento de 500 ppm de AG<sub>3</sub> fue más favorable para el desarrollo del fruto que el de 100 ppm.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Inducción de partenocarpia in situ, en Zacatecas.

El experimento se realizó directamente en huertas en producción que se encuentran en la comunidad de Encinitos, municipio de Pinos, en el estado de Zacatecas, que se localiza entre los paralelos  $21^{\circ} 47'$  y  $22^{\circ} 45'$  de latitud norte; los meridianos  $101^{\circ} 17'$  y  $101^{\circ} 50'$  de longitud oeste; con altitud de 2,140 m (Figura 5). El 100 % de la superficie municipal se encuentra incluida en el clima semiseco templado. Su temperatura media anual promedio es de  $16.2^{\circ}\text{C}$  y la del año más caluroso  $18.4^{\circ}\text{C}$ . La precipitación pluvial total anual promedio es de 429.6 mm y la del año más lluvioso es de 720.5 mm. Los meses con mayor frecuencia de heladas son noviembre, diciembre, enero y febrero.

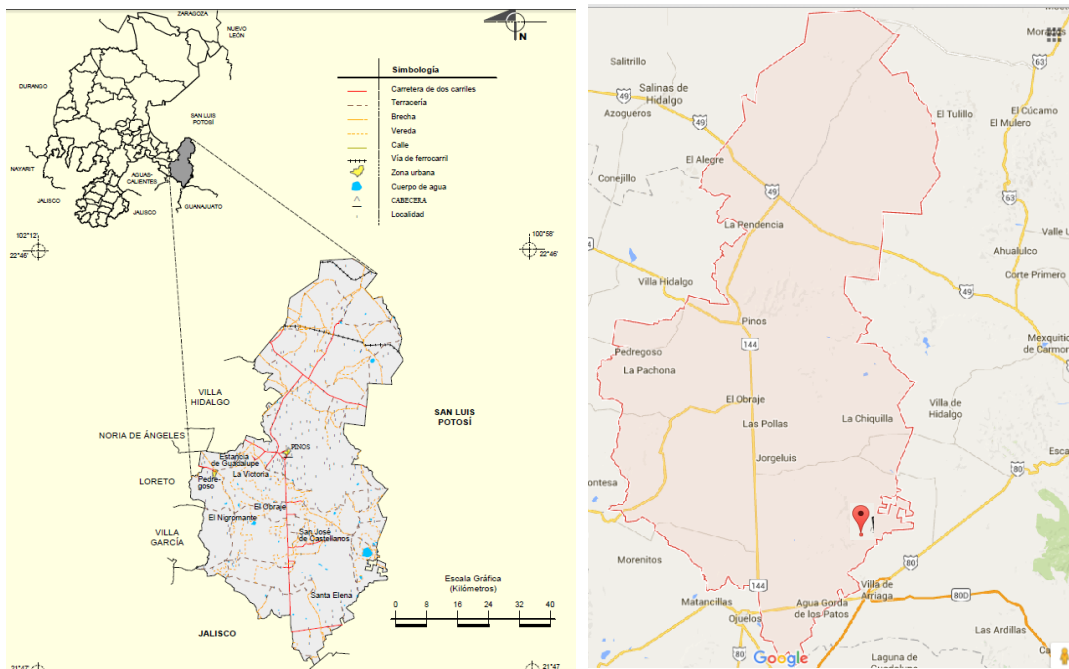


Figura 5. Localización del experimento (punto rojo)



### 3.2 Descripción de los Cultivares estudiados

De acuerdo con Gallegos y Mondragón (2011) se describen los cultivares utilizados:

#### **Burrona (*Opuntia albicarpa* Sheinvar).**

Es el cultivar más importante en el estado de Zacatecas y está presente en todos los huertos de solar, por lo que se cree que es originario de este estado. Se cultiva también en Jalisco, San Luis Potosí, Aguascalientes Guanajuato e Hidalgo en una superficie aproximada de 12,000 ha. Planta de vigor alto, hábito erecto y porte medio; cladodios de longitud media y de forma elíptica, con abundantes espinas. Flor con perianto de color anaranjado. El fruto es, junto con el de la variedad Cristalina, de los de mayor tamaño dentro de los cultivares comerciales, registrando un promedio de 9.21 cm de largo y 6.79 cm de ancho, de forma elíptica y con pocas glóquidas; su receptáculo es amplio, estriado y aplanado: cáscara y pulpa de color verde claro. La pulpa representa 59.5 % del peso total (216 g), y presenta un número alto de semillas (378) completamente desarrolladas de tamaño grande, por lo que se le señala como tuna “semillona”, y tiene pocas semillas abortadas. Su pulpa tiene 11.9 °Brix. Su principal desventaja es el número y tamaño de semillas, siendo de hecho su principal limitante para su aceptación por los consumidores, particularmente los extranjeros (Figura 6).



**Figura 6. Variedad Burrona**

**Cristalina (*Opuntia albicarpa* Sheinvar).**

Se le considera una variedad originaria de Pinos, Zacatecas. Dentro de las áreas de cultivo destaca la región sureste del estado de Zacatecas, sobresaliendo el municipio de Pinos. Se cultiva también en Puebla, Jalisco y Aguascalientes. Cultivada en 2,459 ha de superficie. Planta de vigor alto y porte abierto, cladodios largos y anchos de forma obovada estrecha, con escasas espinas cortas. Flor con perianto color anaranjado. Su fruto es de los de mayor tamaño dentro de los cultivares comerciales con 9.65 cm de largo y 6.65 cm de ancho en promedio, de forma elíptica y con pocas glóquidas (ahuates); cáscara verde claro y pulpa color blanquecino. La pulpa representa el 60 % del peso total (210 g), presenta un número alto de semillas (397) completamente desarrolladas y pocas semillas abortadas. Pulpa con 13° Brix. Se trata de los cultivares de alta productividad, registrando rendimientos superiores a las 30 ton/ha en el estado de Puebla. Presenta buena calidad de fruto para su consumo en fresco, incluyendo su resistencia al manejo postcosecha y su periodo de cosecha tardío (Figura 7).



**Figura 7. Variedad Cristalina**

### **Amarilla Montesa o Amarilla Huesona (*Opuntia megacantha* Salm-Dick)**

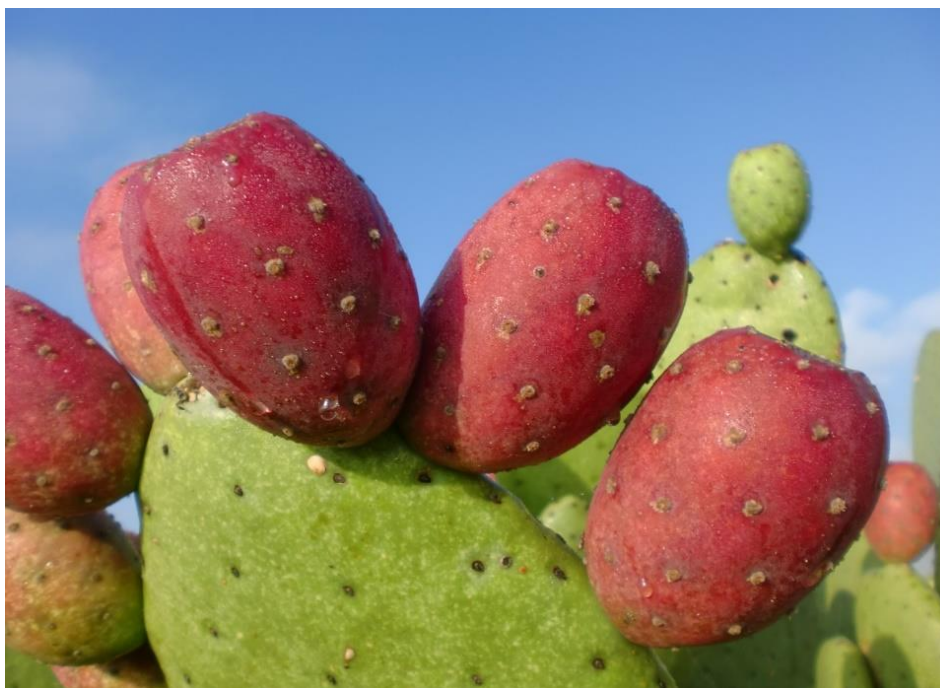
Se cultiva aproximadamente en 1,700 ha, concentradas principalmente en los municipios de Pinos y Villa García, Zacatecas en donde alcanza las 1250 hectáreas, registrándose pequeñas superficies en los estado de Aguascalientes, San Luis Potosí y Guanajuato. Planta de hábito abierto y altura baja; cladodios de longitud media, estrechos, oblongos con un número medio de espinas. Cultivar de vigor y productividad intermedios y maduración intermedia (julio –agosto); es junto con el cultivar Pico Chulo, el de mayor aceptación y demanda en cuanto a las tunas de coloración amarillo-anaranjado. Flor con perianto de color anaranjado. El fruto es alargado (9.16 y 5.92 cm de largo y ancho, respectivamente), de forma elíptica, con pocas glóquidas y de color amarillo. El color de la cáscara es anaranjada y la pulpa amarilla, firme de jugosidad alta, que representa 57.2% del peso total (172.2 g); contiene un número medio de semillas (265) completamente desarrolladas, de tamaño grande y baja presencia de semillas abortadas. Pulpa con 12.7° Brix (Figura 8).



**Figura 8. Variedad Amarilla Montesa o Amarilla Huesona**

### **Rojo Pelón (*Opuntia ficus-indica* L.)**

Originaria posiblemente del norte de Guanajuato y sur de SLP, en el altiplano meridional. La superficie plantada con ella es de alrededor de 1350 ha en el centro-norte de México, principalmente en los estados de Guanajuato y Zacatecas. Planta de crecimiento vigoroso con hábito decumbente; cladodios elípticos, pequeños a medianos, gruesos, color verde oscuro y sin espinas. La flor con perianto de color amarillo marrón. El fruto es tamaño mediano a grande (5.7 y 8.5 cm, respectivamente), elíptico a obovado y con pocas glóquidas color marrón. La cáscara es color rojo oscuro y la pulpa roja, de jugosidad y consistencia altas, y con baja presencia de mucílago. La pulpa representa el 61.3 % de peso total (150 g), y presenta un número medio de semillas (278) completamente desarrolladas, de tamaño grande y un bajo contenido de semillas abortadas. Pulpa con 14.9 °Brix. Se considera la variedad de pulpa roja más importante en México (Figura 9).



**Figura 9. Variedad Rojo Pelón**

### **3.3 Características de las huertas**

El cultivar Amarilla Montesa se localiza en un huerta cercana a la comunidad, llamada “Las Caidillas”, repartidas en una superficie de 10 h, con pendiente de 3 %; la plantación tiene una edad 15 años, la densidad es de 800 plantas/ha, a 2.5 m entre planta y planta y separación de hileras de 5 m, se ha realizado poda de cladodios moderadamente y controlado las plantas arbustivas (malezas) y la última aplicación de estiércol de bovino fue hace dos años (15 kg/planta aproximadamente).

Los cultivares Rojo Pelón, Cristalina y Burrona se localizan en la misma comunidad, en distintas huertas vecinas, en terrenos planos. El Rojo Pelón tiene 5 años de establecido en una superficie de 2 ha., con arreglo de 5 m entre hileras y 4 m entre plantas (500 plantas/ha), no se han realizado podas, solo control de arbustos y abonado con estiércol bovino un año antes del estudio. La Cristalina está en una huerta de una hectárea, la plantación es de 2.5 m entre plantas y a 4 m entre hileras, con una densidad de 1,000 plantas/ha, la edad es de 12 años, se realizaron podas moderadas y la aplicación de abono fue dos años antes del estudio. Por último el cultivar Burrona está establecida en una hectárea a densidad de 1,142 plantas/ha, 3.5 m entre hilera y 2.5 m entre plantas; se ha realizado poda y abonado. En ninguna de las huertas se hace control de plagas y enfermedades.

### **3.4 Diseño experimental y tratamientos**

El diseño experimental utilizado en esta investigación fue factorial completo con 2 factores y 4 niveles ( $4^2$ ), dando un total de 16 tratamientos (Cuadro 2), con 20 repeticiones por tratamiento. El primer factor es variedad y sus niveles son: Amarilla Montesa (AM), Burrona (Br), Cristalina (Cr) y Rojo Pelón (RP); el segundo factor fue concentración de Ácido giberélico ( $AG_3$ ) con 4 niveles: 50, 100, 200 y 0 (testigo) ppm de  $AG_3$ .

**Cuadro 2. Factores y niveles de estudio en el experimento**

<b>FACTOR</b>	<b>NIVEL</b>	<b>COMBINACIÓN (variedad por concentración)</b>
<b>VARIEDAD</b>	Amarilla Montesa (AM) Burrón (Br) Cristalina (Cr) Rojo Pelón (RP)	AM-0
		AM-50
		AM-100
		AM-200
		Br- 0
		Br-50
		Br-100
		Br-200
		Cr-0
		Cr-50
<b>CONCENTRACIÓN DE AG<sub>3</sub></b>	0 ppm AG <sub>3</sub> (Testigo)	Cr-100
	50 ppm de AG <sub>3</sub>	Cr-200
	100 ppm de AG <sub>3</sub>	RP-0
	200 ppm de AG <sub>3</sub> (200-AG <sub>3</sub> )	RP-50
		RP-100
	RP-200	

Los frutos testigo fueron de flores en polinización libre a las que no se aplicó solución de AG<sub>3</sub>, solo se marcaron para su posterior identificación. A las flores tratadas con AG<sub>3</sub> se les emasculó previamente a la aplicación de su tratamiento correspondiente. Las aplicaciones se hicieron en 30 flores de cada variedad para asegurar un mínimo de 20 frutos por tratamiento al final del experimento.

En cada huerta se eligió una parte de la plantación de dos o tres hileras (omitiendo las de los costados) de 60 m de largo aproximadamente. Se seleccionaron plantas al azar que presentaron condiciones similares (sanas, altura, porte, edad, etc). Cada unidad experimental estuvo conformada por una flor, procurando que no hubiera un exceso de flores por cladodio, si fuese el caso, se hizo el “raleo” dejando máximo 4 flores por cladodio.

Por último cada flor tratada fue identificada con marcador de tinta permanente para su posterior identificación. Todo esto se realizó en la segunda semana del mes de abril del año 2014.

### 3.5 Cosecha de los frutos

Se realizaron dos cosechas: el 17 de agosto y el 14 de septiembre del 2014.

La cosecha se hizo cuando los frutos presentaron pigmentación en 80% o más. El corte de la tuna se hizo con navaja en la base del fruto. Los ahuates (gloquidios) de los frutos se removieron con ayuda de una escoba. En seguida se marcaron y se colocaron en una caja de cartón para su traslado inmediato al laboratorio para la toma de mediciones (en el Colegio de Postgraduados-Montecillos).

### 3.6 Variables evaluadas

**Longitud de fruto (LF).** Se midió con un vernier digital Truper® stainless Steel con precisión de 0.001 cm.

**Diámetro ecuatorial del fruto (DEF).** Con el mismo vernier se midió la parte más ancha del fruto de su parte central.

**Grosor de cáscara (GC).** Se hizo un corte longitudinal al fruto, después se separó la cáscara y al centro de ésta se midió su grosor con el vernier digital.

**Peso del fruto (PF).** Se obtuvo con ayuda de una balanza digital Scout® Pro con precisión de 0.01 g.

**Peso de la cáscara (PC).** Se extrajo la pulpa del fruto y se pesó la cáscara en la balanza digital.

**Peso de la pulpa (PP)** Se obtuvo de la diferencia entre PF y PC en fresco.

**Grados Brix de la pulpa.** Se extrajeron de dos a tres gotas de jugo directamente de la pulpa y se colocaron en el sensor óptico del refractómetro digital marca ATAGO® PAL-1. La lectura es en grados Brix.

**Grados Brix de la cáscara.** Se extrajeron de dos a tres gotas directamente de la cáscara y se colocaron en el refractómetro digital.

**Relación peso de pulpa/peso de fruto.** Se obtuvo dividiendo el peso de pulpa entre peso del fruto multiplicado por 100.

**Relación de peso de cáscara de fruto/peso de fruto.** Se obtuvo dividiendo el peso de la cáscara entre peso del fruto multiplicado por 100.

**Relación grados Brix de cáscara/grados Brix de pulpa.** Se obtuvo dividiendo lo grados Brix de la cáscara entre lo grados Brix de la pulpa multiplicado por 100.

**Número de semillas o de residuos (tegumentos vacíos, sin embrión) seminales (RS) (según el caso).** La pulpa del fruto se colocó en una coladera de plástico y se lavó con agua a presión hasta no dejar residuos de pulpa. Después las semillas o los RS se colocaron en papel cera y se secaron al ambiente. En frutos testigos se contó el número total de semillas (normales y abortivas) por fruto.

**Peso de semillas y de RS (g).** Se pesaron en una balanza analítica SARTORIUS H51.

**Tamaño de semillas o de RS.** Se midió con ayuda del vernier digital el largo, ancho y espesor (mm). Se tomaron 10 semillas al azar de los frutos testigos y 10 RS al azar de frutos partenocárpicos por cada variedad. Esta variable no se sometió a análisis estadístico.

### **3.7 Análisis estadístico**

Se realizaron análisis de varianza para cada variable con el paquete de software SAS (Statistical Analysis System), versión 9.3. El modelo estadístico para el experimento factorial con dos factores A (variedad) y B (AG<sub>3</sub>) en un diseño completamente al azar es el siguiente:



$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + e_{ijk}$$

donde:

$Y_{ijk}$  = es la  $ijk$ -ésima observación en el  $i$ -ésimo nivel del factor A y  $j$ -ésimo nivel del factor B

$\mu$  = es la media general

$A_i$  = es el efecto del  $i$ -ésimo nivel del factor A

$B_j$  = es el efecto del  $j$ -ésimo nivel del factor B

$AB_{ij}$  = es la interacción del  $i$ -ésimo nivel del factor A con el  $j$ -ésimo nivel del factor B;

$e_{ijk}$  = es el error aleatorio NID  $(0, \sigma^2)$ .

Para las variables porcentuales se procedió a la transformación de los datos, de porcentuales a normales con la función arco seno:

$$Y = \text{Arcsin}\sqrt{(X/100)}$$

Donde:

$Y$  = variable transformada

$X$  = variable respuesta en % (0 a 100 %)

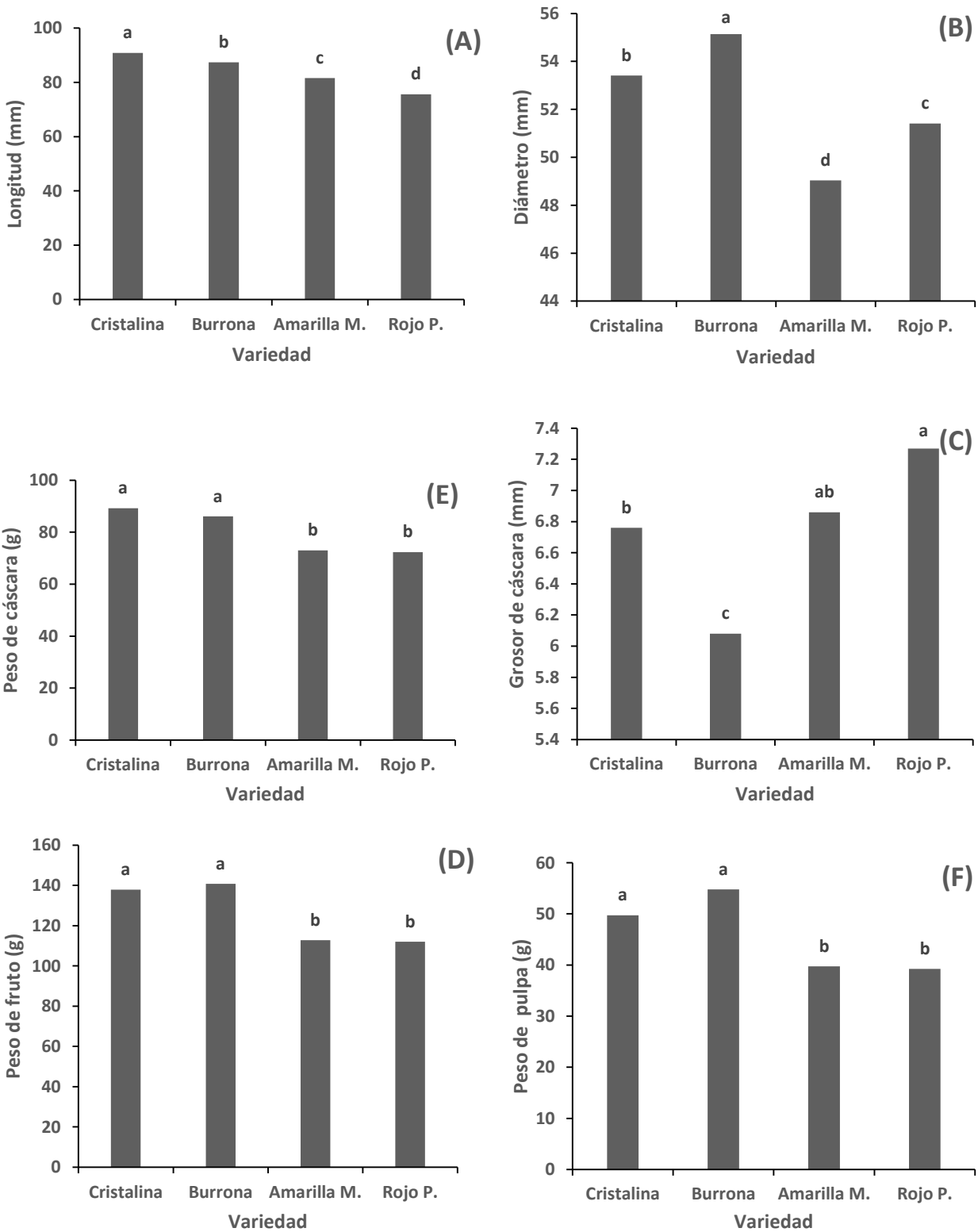
En los casos donde hubo diferencias significativas entre tratamientos se aplicó la prueba de medias de Tukey con  $\alpha=0.05$ .

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Factor Variedad

Todas las variedades fueron diferentes en longitud y diámetro de fruto ( $P \leq 0.05$ ). Los frutos de Cristalina fueron los más largos y los de Burróna los más anchos. Ambas variedades se caracterizan por tener el fruto de mayor tamaño dentro de los cultivares comerciales, registrando un promedio de 9.21 cm de largo y 6.79 cm de ancho (Mondragón y Gallegos, 2011) valores similares a los encontrados aquí. En cambio los frutos de Amarilla Montesa son un poco alargados y con diámetro angosto, mientras que los de Rojo Pelón son un poco más pequeños (Figura 10 A y B). Las cuatro variedades presentan el mismo comportamiento en peso de fruto y peso de cáscara. Los frutos de Cristalina y Burróna fueron los más pesados (140 g) y con peso de cáscara similar (87 g), y los de Amarilla Montesa y Rojo Pelón tuvieron valores más bajos 112 g de peso de fruto y peso de cáscara 73 g. Cristalina resultó con cáscara gruesa (6.7 mm) y por consiguiente su proporción con respecto al peso del fruto fue mayor, es decir, la cáscara ocupó el 72 % del total del fruto. En Burróna la cáscara fue más delgada (6 mm) y presentó la relación cáscara/peso más baja (67%), mientras que Rojo Pelón obtuvo la cáscara más gruesa (7.2 mm); sin embargo, su proporción respecto al fruto (69 %) fue semejante al de las otras variedades; lo mismo sucedió en Amarilla Montesa, aunque tuvo un grosor de cáscara menor (6.8 mm) (Figura 10).

El peso de la pulpa de las tunas de las cuatro variedades representó en promedio el 30 % del peso del fruto y fue Burróna la que presentó una mayor proporción de pulpa (33 %) y Amarilla Montesa la menor (29 %) (Figura 10 F).



**Figura 10. Características de calidad del fruto de cuatro variedades de nopal tunero (barras con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05).**

El contenido de sólidos solubles totales o Grados Brix ( $^{\circ}\text{Bx}$ ) fue similar en todas las variedades, alrededor de los 11 para la pulpa del fruto y de 9 a 10 en la cáscara; es decir, hubo aproximadamente un  $^{\circ}\text{Bx}$  de diferencia entre la pulpa y la cáscara (Figura 11 A y B).

Hubo diferencia significativa entre Cristalina y Burróna en los  $^{\circ}\text{Bx}$  de la pulpa; Cristalina tuvo el valor más alto (12  $^{\circ}\text{Bx}$ ) y Burróna el más bajo (11  $^{\circ}\text{Bx}$ ). De las cuatro variedades, Amarilla Montesa presentó mayor contenido de  $^{\circ}\text{Bx}$  en la cáscara (10.5  $^{\circ}\text{Bx}$ ) con solo 8 % menos que su respectiva pulpa, mientras que en las otras tres variedades fue cercano a 16 % menos que en la pulpa (Figura 11 A, B y C).

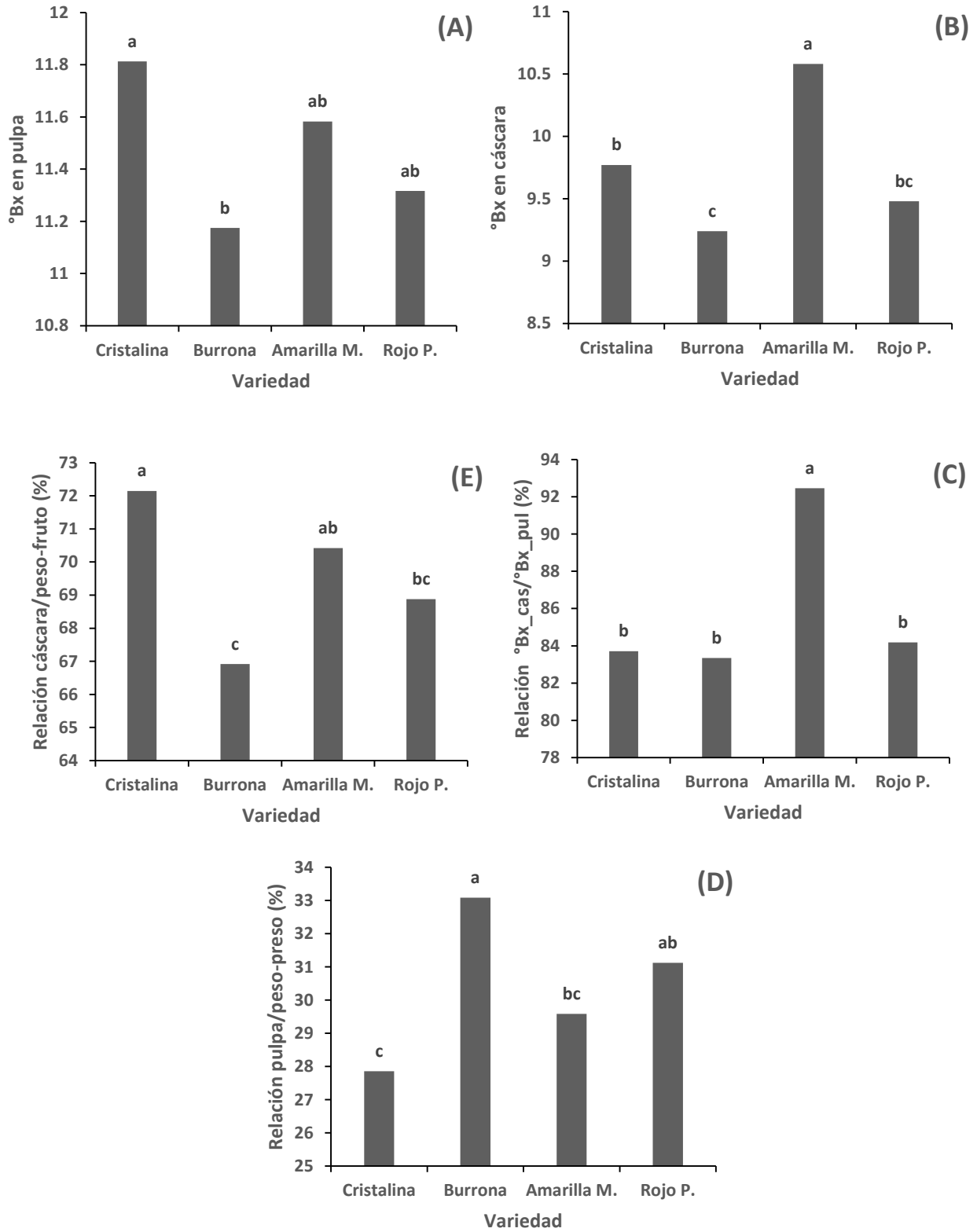


Figura 11. Características de calidad de fruto de cuatro variedades de nopal tunero (barras con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05).

El Cuadro 3 muestra el número total de semillas (NTS) y el número total de residuos seminales (NTRS) y respectivos pesos (promedio general de los frutos tratados y no tratados) de cada variedad. Se encontró que la variedad Cristalina tuvo un alto NTS y NTRS por fruto, en promedio 380; en contraste Amarilla Montesa presentó el número más bajo, 270 semillas. Aunque Burróna obtuvo el menor NTS y NTRS que cristalina, su peso total de semillas (PTS) y peso total de residuos seminales (PTRS) fue mayor con 4 gramos de diferencia en promedio por fruto.

**Cuadro 3. Efecto promedio de la variedad sobre el número de semillas y residuos seminales (RS) de cuatro variedades de nopal tunero.**

<b>Variedad</b>	<b>NTS y NTRS</b>	<b>PTS y PTRS (g)</b>
<b>Cristalina</b>	382.7 a	1.8 b
<b>Burróna</b>	295.5 b	2.2 a
<b>Amarilla</b>	269.2 c	1.2 c
<b>Rojo Pelón</b>	289.5 bc	1.2 c
<b>DMS</b>	<b>25.1</b>	<b>0.2</b>

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); DMS: Diferencia Mínima Significativa; NTS: Número Total de Semillas; PTS: Peso total de Semillas; NTRS: Número de Residuos Seminales; PTRS: Peso de Residuos Seminales.

En el siguiente cuadro, se presentan los resultados del número y peso de semillas promedios por fruto solo de las tunas provenientes de flores no tratadas con AG<sub>3</sub> de cada variedad.

**Cuadro 4. Promedios del número y peso de semillas por fruto de tunas normales (testigos) de cuatro variedades de nopal tunero.**

VARIEDAD	Número de semillas			Peso de semillas (g)		
	Totales	Normales	Abortivas	Totales	Normales	Abortivas
<b>Cristalina</b>	374.7 a	278.7 a	96.0 a	7.1 b	6.4 b	0.74 a
<b>Burrona</b>	327.0 b	278.3 a	48.7 b	8.7 a	8.3 a	0.40 b
<b>Amarilla</b>	252.0 c	221.5 a	30.5 bc	4.6 c	4.5 c	0.15 c
<b>Rojo Pelón</b>	245.1 c	223.1 a	22.0 c	4.8 c	4.7 c	0.08 c
<b>DMS</b>	<b>40.4</b>	<b>38.281</b>	<b>18.9</b>	<b>0.86</b>	<b>0.84</b>	<b>0.14</b>

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); DMS: Diferencia Mínima Significativa

Rojo Pelón y Amarilla Montesa contienen alrededor de 250 semillas por fruto (totales) y, Burrona alrededor de 300, mientras que Cristalina tuvo el número más alto (375); sin embargo, sus semillas son menos pesadas que las de Burrona, así mismo contiene el número más alto de semillas abortivas (96) lo cual la hace interesante ya que al ser sus semillas pequeñas, los frutos entonces tienen mayor volumen ocupado por la parte comestible (Pimienta, 1990). La Burrona es señalada como una variedad “semillona” y con pocas semillas abortivas (Gallegos y Mondragón, 2011), lo cual concuerda con los resultados obtenidos en esta investigación. Estos resultados en parte explican por qué los frutos de las variedades de pulpa blanca son más pesados que los de pulpa de color, como señalan Barbera *et al.* (1994) que a mayor número de semillas mayor peso del fruto.

## 4.2 Factor Dosis

El ácido giberélico promovió el desarrollo del fruto en todas las dosis aplicadas (50, 100 y 200 ppm) a las flores emasculadas en preantesis (que evitó la formación de semillas) lográndose obtener frutos partenocárpicos en las cuatro variedades estudiadas, pero en comparación con los frutos provenientes de las flores no tratadas (testigos) se obtuvieron frutos de menor longitud, diámetro y peso; también peso de pulpa, relación pulpa/peso del fruto y °Bx tanto de la pulpa como de la cáscara. La cáscara de los frutos resultantes de las aplicaciones de AG<sub>3</sub> aumentó su grosor y peso y, en consecuencia, la relación cáscara/peso fue relativamente alta y baja la relación pulpa/peso (Figura 12), resultados que concuerdan con los obtenidos por Corrales y Hernández (2005).

La longitud y diámetro de los frutos testigos fueron mayores, en un poco más de 10 mm, a los de frutos tratados. Se obtuvieron frutos de peso de 189 g cuando no se aplicó AG<sub>3</sub>, y cuando se aplicó a la concentración de 200 ppm disminuyó hasta 116 g, siendo a esta dosis en donde se encontraron los frutos más pesados con respecto a las otras dosis (50 y 100 ppm de AG<sub>3</sub>) (Figura 12 C). La diferencia de dimensiones entre frutos normales y partenocárpicos se atribuye principalmente a la ausencia de semillas verdaderas ya que solamente se presentan residuos seminales no lignificados como fue reportado en trabajos anteriores (López, 2006).

En cuanto al contenido de pulpa, en promedio no se logró aumentar con AG<sub>3</sub> respecto al testigo. Se alcanzó pulpa de 27, 23 y 20 g de peso cuando con 200, 100 y 50 ppm de AG<sub>3</sub>, respectivamente, mientras que en frutos testigos, la pulpa llegó a ser superior a los 100 g (Figura 12 D). Asociado a esto las tunas provenientes de polinización libre tuvieron una relación pulpa/peso mayor a 50 %, mientras que las tratadas fue cercana al 23 %; es decir, se obtuvo frutos partenocárpicos pero estos presentaron una cáscara que representa el 75 % del peso del fruto y la pulpa solamente el 25 %, mientras que en frutos no partenocárpicos el 60% el peso del fruto correspondió a la cáscara y 40% a la pulpa (Figura 12 E y F). Ninguna concentración de AG<sub>3</sub> incrementó el peso total del fruto, en relación con el testigo.



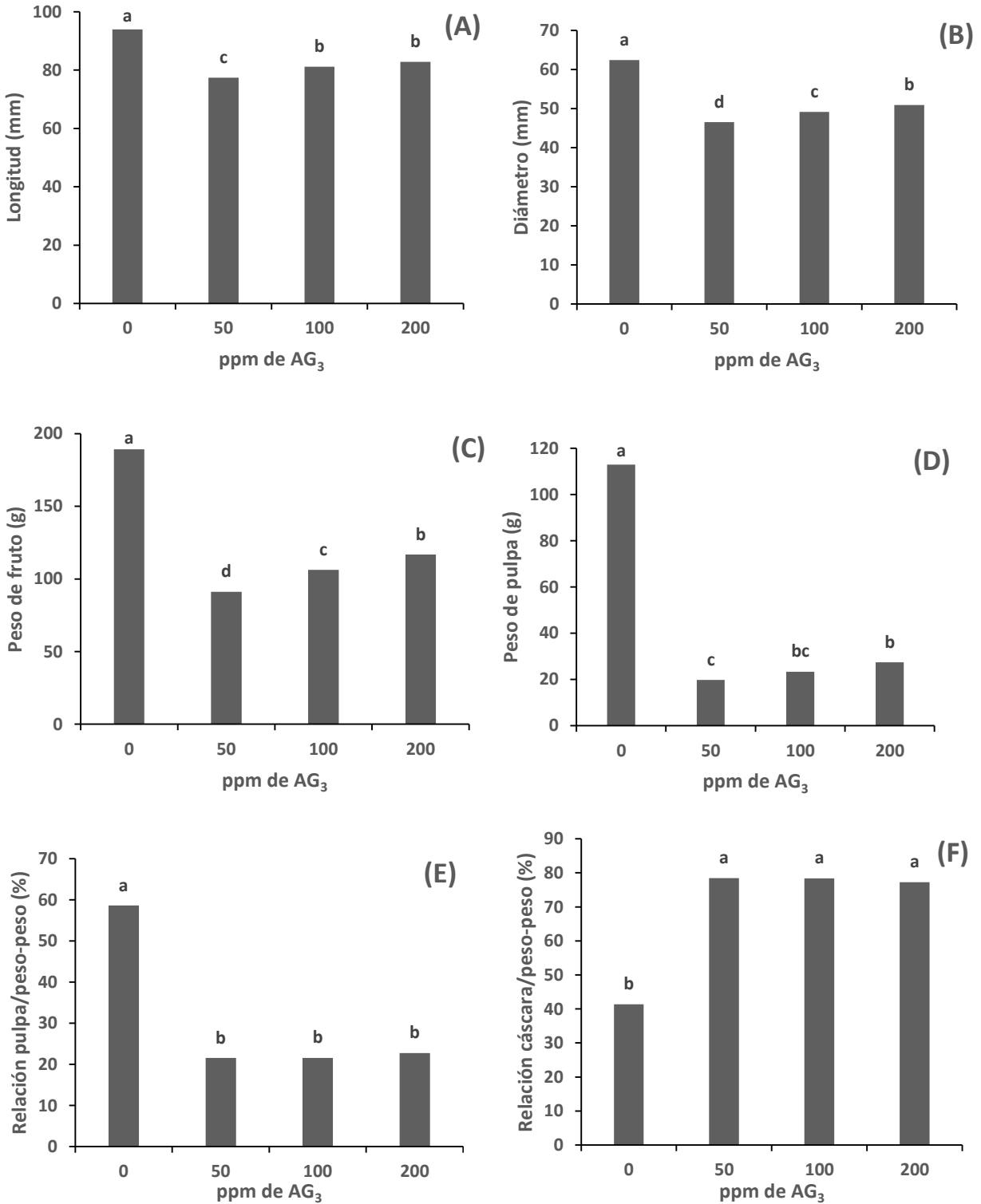


Figura 12. Efecto de tres concentraciones de AG<sub>3</sub> sobre características de calidad de los frutos de cuatro cultivares de nopal tunero (barras con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05).

Con las tres dosis de AG<sub>3</sub> los frutos desarrollaron casi el doble de grosor de la cáscara con respecto a la del testigo, pasando de 4 mm a 8 mm, aproximadamente, siendo el efecto mayor el de la concentración de 200 ppm, que además incrementó significativamente en 12 g el peso de la cáscara (Figura 13 A y B).

Varias investigaciones han demostrado que con el suministro externo de reguladores de crecimiento se puede desarrollar el ovario cuando se evita la polinización para obtener frutos partenocarpicos en diferentes especies del genero *Opuntia*, como en este caso. Sin embargo, persisten problemas que requieren solución, como son frutos con menor tamaño, poca pulpa y mayor grosor de cáscara (Gil *et al.*, 1977; Díaz y Gil, 1978; Mejía, 1986; Aguilar, 1987, Corrales y Hernández, 2005; López, 2006; Hernández, 2009)

Respecto a los °Bx del fruto tanto en pulpa como en cáscara, las aplicación de AG<sub>3</sub> produjo frutos con aproximadamente un °Bx menos en comparación con el testigo, y no se observaron diferencias importantes entre las tres dosis empleadas (Figura 13 C y D). Resultados similares se han obtenido con el uso de varios reguladores (Aguilar, 2003; Ortiz *et al.*, 1991); donde los °Bx en cáscara fueron menores que en la pulpa (de uno a dos grados de diferencia). Los resultados indican que durante la maduración, tanto la cáscara como la pulpa acumulan solidos solubles totales, siendo menos en frutos tratados con reguladores con respecto a los no tratados (polinización libre); en otros casos esta variable no se afectó y la acumulación fue similar (Ortiz, 1991). Esto es, como ya lo sugirieron en un principio Muratalla *et al.*, (2002) como un concepto de calidad en tuna partenocárpica, ya que la cáscara de este tipo de fruto al contener °Bx similares al de la pulpa, puede hacerla comestible además tendría los beneficios de consumir la fibra de la cáscara la cual no se aprovecha en frutos con semillas “normales”.

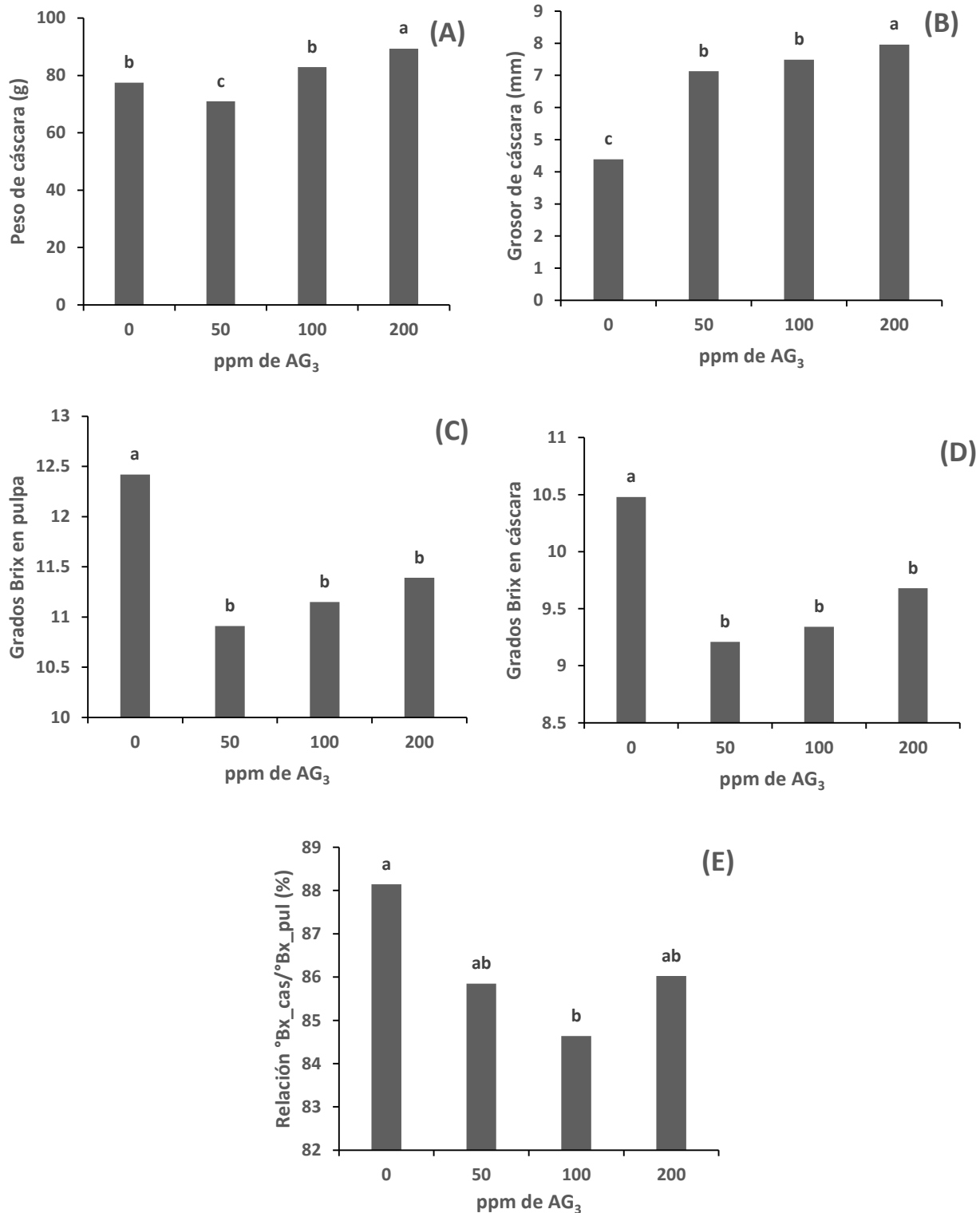


Figura 13. Efecto de tres concentraciones de  $AG_3$  sobre características de calidad de los frutos de cuatro cultivares de nopal tunero (barras con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05).

Al parecer concentraciones más altas de AG<sub>3</sub> en flores emasculadas favorece el desarrollo del frutos en comparación con las no tratadas como lo reportaron Kaaniche-Eloumi *et al.* (2015) donde 500 ppm dio mejores resultados que 100 ppm, sin embargo, los frutos obtenidos fueron menores que en el caso de los frutos que provenían de flores polinizadas.

Debido a la emasculación de las flores para evitar la formación de semillas, los frutos resultantes de las flores tratadas con AG<sub>3</sub> presentaron menor contenido de pulpa encontrándose entre ella solo residuos seminales (RS); estos fueron similares en número a las semillas de los frutos que provenían de flores no tratadas, es decir, con las dosis empleadas no se incrementó el número de RS por fruto con respecto al número de semillas del testigo. Así mismo, se puede observar claramente en el Cuadro 5 que en los frutos testigos las semillas en promedio tuvieron más de 6 g de peso, cuando en los frutos de las dosis de AG<sub>3</sub> los RS por fruto llegaron a pesar por debajo de un gramo sin encontrarse diferencias significativas entre dosis. Esto se puede explicarse en parte por el volumen que ocupan las semillas en el fruto como lo señalaron Pimienta y Engleman (1985) en frutos normales de *Opuntia ficus-indica*, donde las semillas ocupan 42 % del volumen del lóculo, y la envoltura funicular carnosa y el funículo representan un 58 % de la fracción comestible. Entonces las semillas normales representan un alto porcentaje del peso y volumen del fruto, y si, con la aplicación de AG<sub>3</sub> se reduce su tamaño, por consecuencia también se reducirá el volumen, como sucedió en este estudio.

**Cuadro 5. Efecto de diferentes concentraciones de AG<sub>3</sub> sobre el número y peso de semillas y número y peso de residuos seminales por fruto de cuatro variedades de nopal tunero.**

ppm de AG <sub>3</sub>	Tipo de fruto	NTS y NTRS <sup>†</sup>	PTS y PTRS <sup>†</sup> (g)
<b>0</b>	Normal	299.7 a	6.34 a
<b>50</b>	Partenocárpico	310.5 a	0.08 b
<b>100</b>	Partenocárpico	313.8 a	0.09 b
<b>200</b>	Partenocárpico	312.8 a	0.13 b
<b>DMS</b>		<b>25.1</b>	<b>0.21</b>

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); DMS: Diferencia Mínima Significativa; NTS: Número Total de Semillas; PTS: Peso total de Semillas; NTRS: Número de Residuos Seminales; PTRS: Peso de Residuos Seminales; <sup>†</sup>NTS y PTS hace referencia a los frutos normales, y NTRS y PTRS a los frutos partenocárpicos.

### 4.3 Interacción cultivares x concentraciones de AG<sub>3</sub>

En todas las variedades se observó que la longitud, diámetro y peso de fruto, mostraron una tendencia similar de aumentar ligeramente sus valores conforme se aumentó la dosis de AG<sub>3</sub> aplicada (Figura 14); Cristalina y Burróna fueron las variedades que tuvieron los valores mayores. Los frutos de los testigos alcanzaron valores significativamente más altos en estas variables; resultados que claramente muestran el efecto del AG<sub>3</sub> en promover el desarrollo del fruto después de que se emascula la flor en etapa de preantesis, aunque los frutos no alcanzan el tamaño final como los del testigo. A pesar de que se obtienen frutos sin semilla la cáscara de este aumenta de manera significativa, fue más evidente cuando la concentración de AG<sub>3</sub> incrementa; en contraste, los frutos testigos mantuvieron los valores significativamente más bajos. Se observa que en Amarilla Montesa la cáscara resultó menos gruesa en las tres dosis, comparado con las otras variedades (Figura 14 F). En Amarilla Montesa y Cristalina la dosis de 200 ppm de AG<sub>3</sub> aumentó el peso de cáscara encontrándose diferencias significativas al testigo y las otras dosis (excepto a dosis de 100 ppm en Cristalina) (Figura 14 E). Estos resultados concuerdan en parte con los encontrados por Corrales y Hernández (2005) quienes estudiaron la calidad de la tuna normal y partenocárpica (entre ellas Cristalina) de seis variedades en respuesta a la aplicación de ácido indolbutírico (300 mg L<sup>-1</sup>) y de AG<sub>3</sub> (150 mg L<sup>-1</sup>) encontrando comportamientos diferentes de las variedades; las tunas sin semilla en comparación con sus correspondientes testigos, presentaron menor peso de fruto y los más pesados fueron los de Cristalina. Los mismos autores encontraron que el AG<sub>3</sub> causó alargamiento del fruto en dos variedades (efecto no encontrado en este estudio), y las tunas sin semilla presentaron mayor grosor de cáscara en casi todas las variedades, excepto en Amarilla Milpa Alta; lo que difiere de lo encontrado en esta investigación donde el AG<sub>3</sub> provocó el mismo efecto en las cuatro variedades estudiadas.

La emasculación impidió la formación de las semillas y el AG<sub>3</sub> aumentó el grosor de cáscara e indujo la formación de poca pulpa en las cuatro variedades (Figura 14 D). El peso de pulpa de los frutos tratados en todas las variedades no fue mayor a 35 g

manteniéndose esta tendencia entre las dosis y ninguna de ellas logró aumentar el contenido de pulpa. En contraste la pulpa de los testigos superó los 88 g.

En las cuatro variedades la relación pulpa/peso no alcanzó más de 26 %, cuando en el testigo, la pulpa lo fue arriba de 55 %; solo en Cristalina la relación pulpa/peso aumentó ligeramente cuando pasó de 50 ppm a 200 ppm y la relación cáscara/peso disminuyó, lo cual es un efecto deseable (Figura 15 A y B).

Los efectos del AG<sub>3</sub> se han estudiado en diferentes especies y variedades desde décadas pasadas, como en *O. ficus-indica* (Gil *et al.*, 1977; Díaz y Gil, 1978, Gil y Espinosa, 1980; López, 2006, Hernández, 2009; Kaaniche-Elloumi *et al.*, 2015) en *Opuntia amyclaea* (Mejía, 1986; Ortiz, 1991) y *Opuntia megacantha* (Corrales y Hernández, 2005) quienes han aplicado principalmente AG<sub>3</sub> o combinado con otros reguladores de crecimiento ya sea sobre flores emasculadas o en la antesis, llegando a resultados similares logrando obtener frutos sin semillas pero con baja calidad de fruto, afectada principalmente por el grosor de la cáscara, poca pulpa y frutos más pequeños que los testigos. Los frutos de los testigos presentan diferentes tamaños; al respecto, Pimienta (1991) explica que hay una gran variación en tamaño de fruto entre las diferentes variedades de tuna, algunas con fruto muy pequeño, como la tuna silvestre Cardona, que contrasta con otras variedades de fruto muy grande, como los de Cristalina y Burróna. Además, Pimienta y Engleman, (1985) señalan que hay variación en el grado de producción de semillas abortivas, las cuales tienen la capacidad de formar una envoltura funicular carnosa, semejante a la que se forma a partir de las normales.

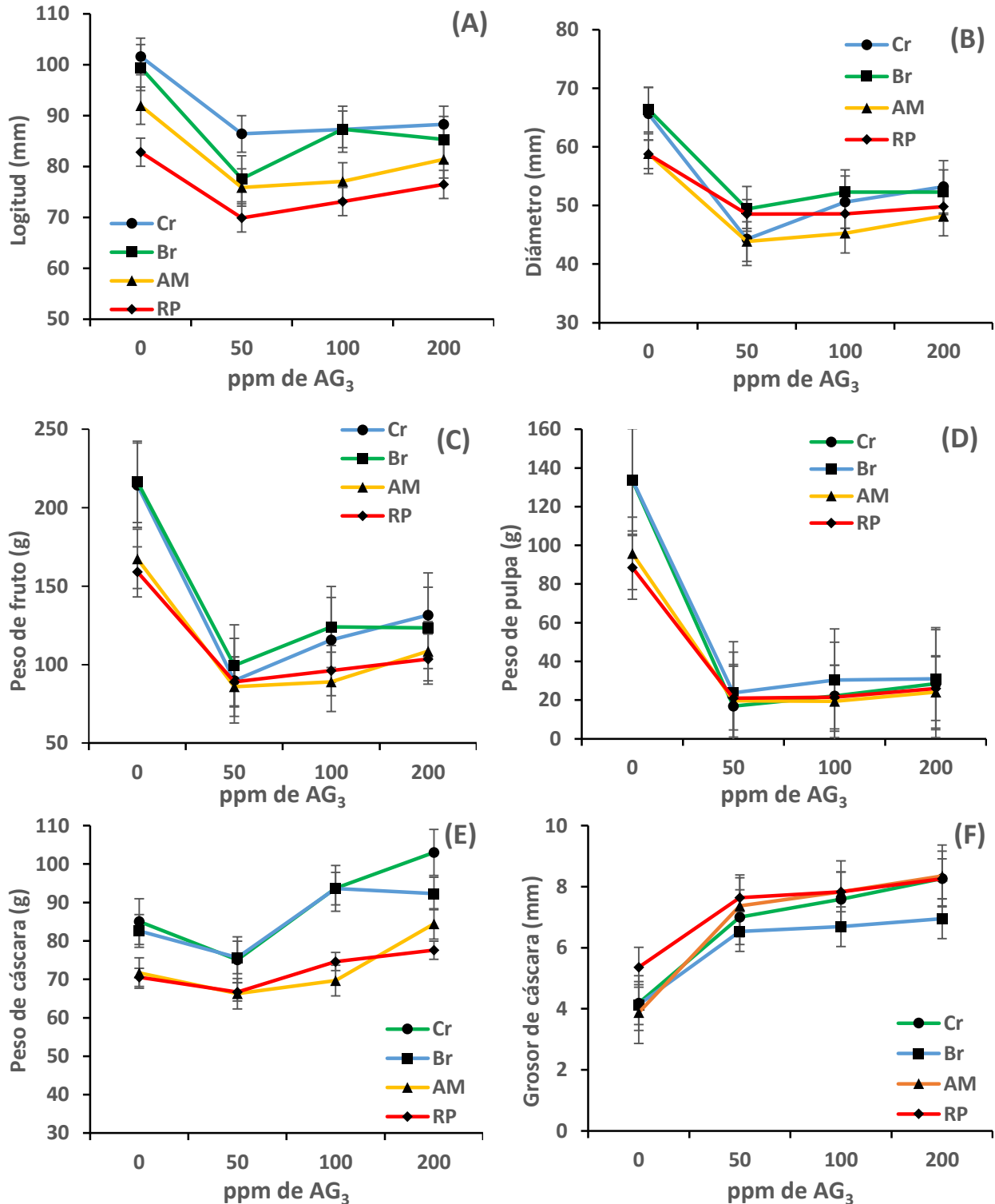


Figura 14. Respuesta de características del fruto a diferentes concentraciones de ácido giberélico (AG<sub>3</sub>) en cuatro variedades de nopal tunero (Cr=Cristalina, Br=Burrón, AM=Amarilla Montesa y RP=Rojo Pelón).

En comparación con los frutos normales, los tratados con AG<sub>3</sub> presentaron una ligera disminución en los sólidos solubles totales en la pulpa y en la cáscara (Figura 15 C y D). Cristalina mostró una tendencia a incrementarlos conforme aumentó la dosis; Burróna presentó valores menores y estables en frutos tratados y no tratados no se encontró diferencias significativas entre tratamientos. Amarilla Montesa tuvo los valores más altos en grados Brix (°Bx) de su cáscara cuando se aplicaron 50 ppm y 100 ppm de AG<sub>3</sub> (Figura 15 D) de tal manera que la cáscara resultó con dulzor similar (mayor a 90%) al de su pulpa (Figura 15 C) lo que resulta atractivo si se desea consumir la cáscara.

Con el AG<sub>3</sub> aplicado a flores emasculadas se logró que el fruto desarrollara pulpa encontrándose en lugar de lo que serían semillas, cubiertas seminales vacías (csv). Cristalina y Amarilla Montesa contrastan por su número de semillas y de csv (ver tipo de fruto en el Cuadro 6) por fruto; la primera tuvo el mayor número y la segunda el menor, no se encontraron diferencias significativas entre sus respectivos tratamientos. En Burróna la concentración de 200 ppm de AG<sub>3</sub> disminuyó el número de cvs comparado al número de semillas de su testigo que fue alto; y en Rojo Pelón las tres concentraciones de AG<sub>3</sub> aumentaron el número de csv por fruto, todas significativas al testigo (Cuadro 6).

Como era de esperarse el peso de las csv fue relativamente bajo comparado con las semillas de los frutos testigos, con las tres concentraciones de AG<sub>3</sub> se desarrollaron frutos con cvs relativamente menores a las semillas de los frutos no tratados, pero no se encontraron diferencias significativas entre concentraciones de AG<sub>3</sub> (Cuadros 7). Según Gil *et al.*, 1977, existe correlación entre el desarrollo de semillas y el tamaño y forma final de los frutos, ya que las semillas con embrión son de mayor tamaño y producen mayor cantidad de hormonas y pulpa, en este caso se evita la formación de semillas al impedir la fecundación y formación de embriones por medio de la emasculación de flores, aparte que el tamaño final de la tuna depende del número de semillas fecundadas (Barbera *et al.*, 1994).



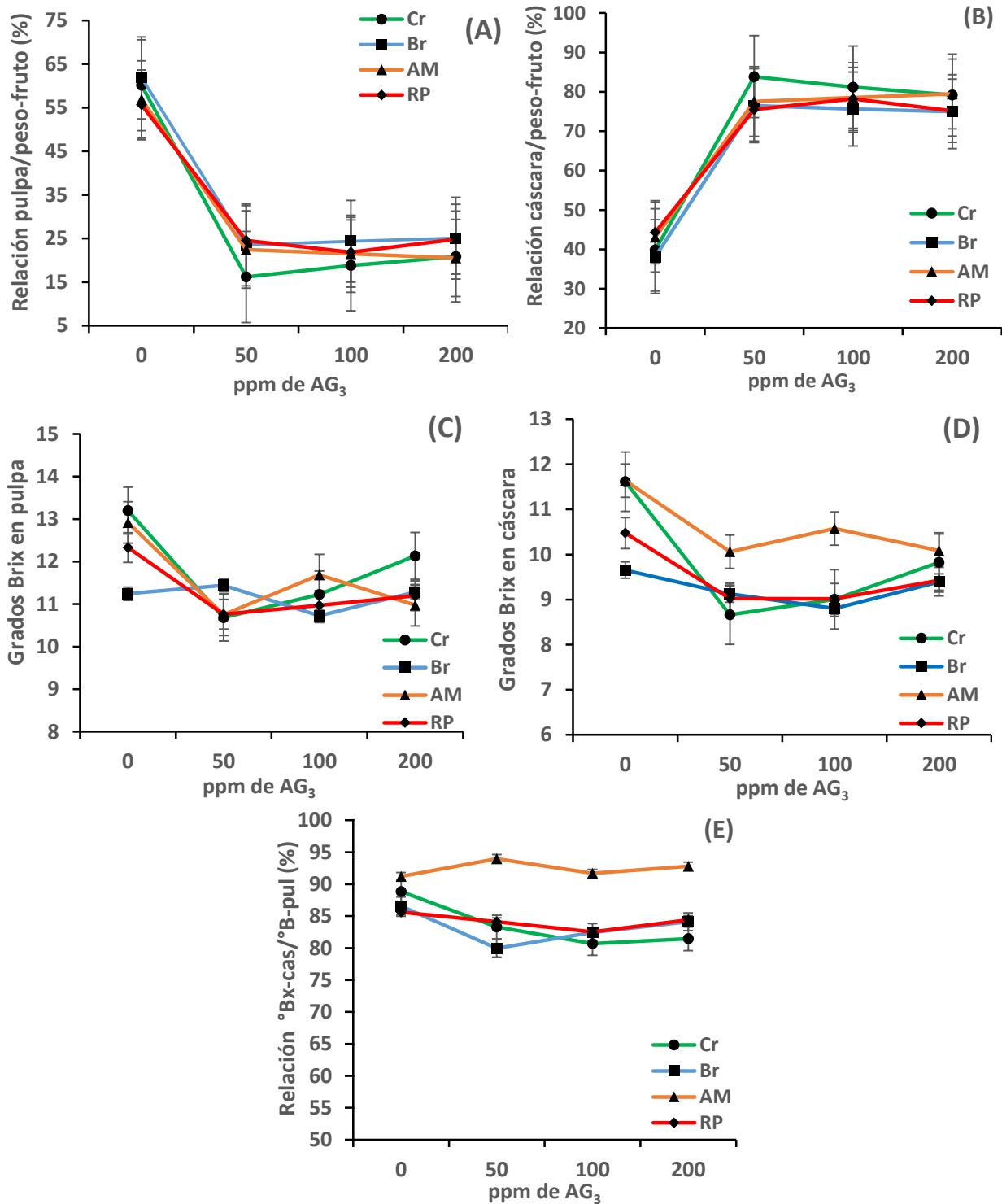


Figura 15. Respuesta de características del fruto a diferentes concentraciones de ácido giberélico (AG<sub>3</sub>) en cuatro variedades de nopal tunero (Cr=Cristalina, Br=Burrón, AM=Amarilla Montesa y RP=Rojo Pelón).

**Cuadro 6. Número promedio de semillas y residuos seminales por fruto en tunas normales y tunas partenocárpicas obtenidas con aplicación de tres dosis de AG<sub>3</sub> en cuatro variedades de nopal**

ppm de AG <sub>3</sub>	Tipo de fruto	Variedad			
		Amarilla M.	Burrona	Cristalina	Rojo P.
<b>0</b>	Normal	252.0 a	327.0 a	374.7 a	245.1 b
<b>50</b>	Partenocárpico	274.1 a	288.3 b	377.5 a	302.1 a
<b>100</b>	Partenocárpico	279.6 a	305.3 ab	362.7 a	307.7 a
<b>200</b>	Partenocárpico	271.0 a	284.8 b	415.7 a	303.0 a
<b>DMS</b>		43.1	37.7	65.5	54.6

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); DMS: Diferencia Mínima Significativa

**Cuadro 7. Peso promedio de semillas y residuos seminales por fruto de tunas normales y tunas partenocárpicas obtenidas con aplicación de tres dosis de AG<sub>3</sub> en cuatro variedades de nopal.**

ppm de AG <sub>3</sub>	Tipo de fruto	Variedad			
		Amarilla M.	Burrona	Cristalina	Rojo P.
<b>0</b>	Normal	4.67 a	8.72 a	7.16 a	4.83 a
<b>50</b>	Partenocárpico	0.08 b	0.07 b	0.10 b	0.11 b
<b>100</b>	Partenocárpico	0.08 b	0.11 b	0.11 b	0.10 b
<b>200</b>	Partenocárpico	0.08 b	0.11 b	0.19 b	0.14 b
<b>DMS</b>		0.39	0.37	0.59	0.35

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); DMS: Diferencia Mínima Significativa

En el cuadro 8 se muestra el tamaño de semilla (largo ancho y espesor) obtenidas de frutos normales, así como de los residuos seminales obtenidos de frutos partenocárpicos.

Se observa que la Burrona es la variedad que presenta semillas muy grandes; medio centímetro de largo y 4 mm de ancho y 2.5 mm de espesor, resultados que concuerdan con esta variedad al ser una de las variedades comerciales con las semillas más grandes lo que resulta poco atractiva para los consumidores (Gallegos y Mondragón, 2011).

Mientras que los RS de los frutos partenocárpicos logrados con las aplicaciones de AG<sub>3</sub> a las flores emasculadas en las cuatro variedades, resultaron relativamente pequeños; en promedio fueron aproximadamente 56 %, 58 % y 90 % menos largos, anchos y gruesos respectivamente que las semillas de los frutos tratados, sumado a esto, en ninguna de las variedades estudiadas se encontró RS con integumentos endurecidos o formación parcial de semillas degeneradas y lignificadas como se reportó en otros estudios llevados a cabo en México (Ortiz Hernández, 1991; Mejía, 2003) y otros países (Gil *et al.*, 1977; Díaz y Gil, 1978; Gil y Espinosa, 1980; Kaaniche-Elloumi *et al.*, 2015). Aunque ya se logró obtener frutos partenocárpicos con RS imperceptibles al paladar, aún falta resolver el problema del bajo contenido de pulpa, lo que las investigaciones futuras deben estar encaminadas principalmente a este aspecto.

**Cuadro 8. Tamaño promedio de semilla y de residuo seminal proveniente de fruto normal y partenocárpico de cuatro variedades de nopal.**

Tamaño (mm)	Fruto normal (ppm de AG <sub>3</sub> )	Fruto partenocárpico (ppm de AG <sub>3</sub> )		
	0	50	100	200
		<b>Amarilla Montesa</b>		
<b>Largo</b>	4.77 (±0.44) *	2.14 (±0.19)	2.25 (±0.25)	2.16 (±0.14)
<b>Ancho</b>	3.57 (±0.24)	1.39 (±0.07)	1.32 (±0.10)	1.47 (±0.16)
<b>Espesor</b>	2.07 (±0.23)	0.24 (±0.05)	0.16 (±0.04)	0.24 (±0.07)
		<b>Burrona</b>		
<b>Largo</b>	5.05 (±0.63)	1.84 (±0.17)	2.30 (±0.18)	2.15 (±0.10)
<b>Ancho</b>	4.13 (±0.45)	1.42 (±0.13)	1.56 (±0.20)	1.62 (±0.17)
<b>Espesor</b>	2.57 (±0.23)	0.28 (±0.08)	0.29 (±0.01)	0.25 (±0.07)
		<b>Cristalina</b>		
<b>Largo</b>	4.78 (±0.32)	2.27 (±0.16)	2.09 (±0.23)	2.44 (±0.28)
<b>Ancho</b>	4.09 (±0.30)	1.55 (±0.11)	1.49 (±0.01)	1.55 (±0.19)
<b>Espesor</b>	2.37 (±0.26)	0.17 (±0.05)	0.19 (±0.04)	0.23 (±0.05)
		<b>Rojo Pelón</b>		
<b>Largo</b>	4.74 (±0.35)	1.96 (±0.20)	1.78 (±0.30)	2.19 (±0.16)
<b>Ancho</b>	3.80 (±0.27)	1.67 (±0.13)	1.46 (±0.20)	1.89 (±0.17)
<b>Espesor</b>	1.92 (±0.19)	0.24 (±0.05)	0.20 (±0.07)	0.30 (±0.07)

\* Media de 10 observaciones (± Desviación estándar)

Considerando todo lo anterior, los resultados y su discusión, no es posible generalizar resultados a nivel de especie y menos de género ya que la respuesta al tratamiento con AG<sub>3</sub> o cualquier otro regulador dependen del genotipo, del ambiente y de su interacción. Es importante señalar que en esta investigación se estudiaron cuatro variedades entre ellas una de la especie *O. ficus-indica*, y aunque diferentes las otras tres son de diferente especie, su respuesta a las concentraciones de AG<sub>3</sub> estudiadas fue similar, por lo que se esperarían mejores resultados si se profundizara más en el aspecto de mejorar la calidad del fruto.

## V. CONCLUSIONES

La aplicación de 50 a 200 ppm de AG<sub>3</sub> indujo la formación de frutos partenocarpicos en flores emasculadas de *Opuntia albicarpa* Sheinvar cv. Burróna, *Opuntia albicarpa* Sheinvar cv. Cristalina, *Opuntia megacantha* Salm-Dick cv. Amarilla Montesa o Amarilla Huesona, y *Opuntia ficus-indica* L. cv. Rojo Pelón. Sin embargo, la calidad del fruto disminuyó porque se obtuvieron frutos de menor longitud, diámetro, peso, relación pulpa/peso y grados Brix en la pulpa y cáscara, así como menor peso de pulpa. En cambio, se obtuvieron frutos de mayor grosor y peso de cáscara; en consecuencia la relación cáscara/peso fue más alta que sin aplicación de AG<sub>3</sub>. Aunque se obtuvieron frutos con poca pulpa y cáscara gruesa, esta última presentó grados Brix similares a los de su pulpa.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar B. G (1987)** Efecto del ácido giberélico (AG<sub>3</sub>) y la urea en fruto de nopal (*Opuntia amyclaea*) Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México.
- Aguilar-Estrada A., J. A. Reyes-Agüero y J. R. Aguirre-Rivera (2003)** Caracterización de la semilla de 403 variantes de nopal (*Opuntia* spp.). *In*: Memoria del IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Esparza G., Salas M., Mena J., Valdez, R. (Eds.). UACH, UAZ e INIFAP, Zacatecas. pp: 117–120.
- Almaguer V. G. (1998)** Principios de fruticultura. Tercera edición en español. Ed Mundiprensa-UACH. México, DF. pp 95-96.
- Alvarado S. L. (1978)** Fisiología y bioquímica del desarrollo del fruto del nopal tunero (*Opuntia amyclaea*, Tenore). Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México.
- Agustí M. (2008)** Crecimiento y maduración del fruto. *In*: Fundamentos de Fisiología Vegetal. Azcon-Bieto J. y Talon M. (eds.). McGrawhill Interamericana. Segunda edición. Madrid, España. pp 519-536.
- ASERCA (Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios) (2011)** Nopal y tuna, una mirada a su realidad actual. *Claridades Agropecuarias*. 213:3-12.
- Bangerth F. and M. Schröder (1994)** Strong synergistic effects of gibberellins with the synthetic cytokinin N-(2-chloro-4-pyridyl)-N-phenylurea on parthenocarpic fruit set and some other fruit characteristics of apple. *Plant Growth Regulation* 15:293-302.
- Barbera G., P. Inglese y T. La Mantia (1994)** Influence of seed content on some characteristics of the fruit of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.). *Scientia Horticultural* 58:161-165.
- Bravo H. H. (1978)** Las Cactáceas de México. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 775 p.
- Callejas-Juárez N., J. A. Matus-Gardea, J. A. Gracia-Salazar, M. A. Martínez-Damián y J. M. Salas-González (2006)** Situación actual y perspectivas de mercado para la tuna, el nopalito y derivados en el estado de México. *Agrociencia* 43:73-82.

- Corrales G. J y C. A. Flores V. (2003)** Nopalitos y tunas: producción, comercialización, poscosecha e industrialización. Ed. UACH-CIESTAAM. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 225 p.
- Corrales G. J. y J. L. Hernández (2005)** Cambios en la calidad poscosecha de variedades de tuna con y sin semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 28:9-16.
- Díaz F. y 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* 5: 109-117.
- Díaz Montenegro D. H. (2002)** Fisiología de árboles frutales. Ed. AGT Editors, S.A. pp. 169-170.
- EIBehi A.W., F. Orlandi, T. Bonofiglio, B. Romano, M. Fornaciari, P. Inglese, G. Sortino, and G. Liguori (2015)** Pollen morphology and reproductive performances in *Opuntia ficus-indica* (L.) MILL. *Acta Horticulturae* 1067:217-223.
- Gallegos V., C., J. Cervantes H., J. Corrales G. y G. Medina G. (2003)** La Cadena Productiva del Nopal en Zacatecas: bases para un desarrollo sostenido. Fundación Produce Zacatecas, A. C. Universidad Autónoma Chapingo, Secretaría de Economía. Zacatecas, México. 201 p.
- Gallegos V., C., C. Mondragón J. and J. A. Reyes A. (2009)** An update on the evolution of the cactus pear industry in Mexico. *Acta Horticulturae*. 811:69-76.
- Gallegos V. C. y C. Mondragón J. (2011)** Cultivares Selectos de Tuna de México al mundo. Ed. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas- Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SNICS-SAGARPA) y Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Chapingo, México. 159 p.
- Gil G. F., M. Morales, y 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 Investigación Agraria* 4:163-169.
- Gil G. F., y A. Espinosa (1980)** Desarrollo de frutos de tuna (*Opuntia ficus-indica*, Mill.) con aplicación prefloral de giberelina y auxina. *Ciencia e Investigación Agraria* 7:141-147.

- Habibi Y., L. Heux, M. Mahrouz y M. R. Vignon (2008)** Morphological and structural study of seed pericarp of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruits. *Carbohydrate Polymers*. 72: 102-112.
- Hernández R. C. (2009)** Fenología, productividad y calidad de fruto con y sin semilla en *Opuntia ficus-indica*. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México. 70 p.
- Iglesias D. J. y M. Talon (2008)**. Giberelinas. *In: Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Azcon-Bieto J. y Talon M. (eds.). McGrawhill Interamericana. Segunda edición. Madrid, España. pp 399-420.
- Kaaniche-Elloumi, N., E. Jedidi, K.B. Mahmoud, A. Chakroun and A. Jemmali (2015)**. Gibberellic acid application and its incidence on *in vitro* somatic embryogenesis and fruit parthenocarpy in an apomictic cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) clone. *ISHS Acta Horticulturae*. 1067: 225-230.
- López S. M. (2006)** Influencia de la partenocarpia en la calidad postcosecha de tuna (*Opuntia ficus-indica*) el caso de la tuna fresa sin semilla. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México. 92 p.
- Luna V. J., J. A. Zebge D., J Mena C. y M. T. Rivera L. (2012)** Manejo de plantaciones de nopal tunero en el altiplano potosino. INIFAP. Folleto para productores. San Luis Potosi. 36 p.
- Mejía A. and M. Cantwell (2003)** Prickly Pear Fruit Development and Quality in Relation to Gibberellic Acid Applications to Intact and Emasculated Flower Buds. *Journal Professional Association for Cactus Development* 5:72-85.
- Méndez G. S. J. y J. García H. (2006)** La tuna: Producción y Diversidad. CONABIO. *Biodiversistas* 68:1-5.
- Méndez G. S. J., D. Talavera M. y J. García E. (2008)** Identificación y control de las enfermedades más comunes en el nopal. *Revista Salud Pública y Nutrición*. 14:105-113.
- Méndez G. S. J. y García H. J (2013)** Aprovechamiento, usos y aplicaciones del nopal. *In: Producción sustentable de tuna en San Luis Potosí*. Gallegos Vázquez C., Méndez Gallegos S. J. y Mondragón Jacobo C. (eds.). Colegio de Postgraduados-Fundación Produce San Luis Potosí. San Luis Potosí, SLP, México. pp. 7-24.

- Mondragon J. C. (2013)** Situación actual y tendencias futuras de la tuna en México. *In:* Memorias del 1<sup>er</sup> simposium internacional tuna-nopal 2013, 7, 8 y 9 de noviembre: Las nuevas tendencias de la cadena agroalimentaria en el mundo. Mondragon J. C. (Ed.). Puebla, Puebla. Pp 127-136.
- Muratalla L. A., M. Livera M., C. Hernández R. y V. González H. (2002)** Tuna fresca 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.
- Nieto-Garibay A. (2003)** Ecología del nopal. *In:* Alternativas para la agricultura de zonas Áridas en el siglo XXI. B. Murillo-Amador, E. Troyo-Diéguez, A. Nieto-Garibay y M. Aguilar-García (eds). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California Sur, México. pp: 27-48.
- Orona-Castillo I., E. Troyo-Diéguez, A. Nieto-Garibay y L. F. Beltran- Morales (2003)** Uso de riego de alta tecnología en la producción de nopal. *In:* Alternativas para la agricultura de zonas Áridas en el siglo XXI. B. Murillo-Amador, E. Troyo-Diéguez, A. Nieto-Garibay y M. Aguilar-García (eds.). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California Sur, México. pp: 95-116.
- Ortiz H. Y. D. (1988)** Efecto del ácido giberélico y auxinas en el fruto del nopal tunero (*Opuntia amyclaea* T). Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, México. 141 p.
- Ortiz H. Y. D., F. Barrientos P., M. Colinas L. y A. Martínez G. (1991)** Ácido Giberélico, Auxinas y sus efectos sobre el fruto de nopal tunero. *Agrociencia serie Fitociencia* 2:17-32.
- Piga, A. (2004)** Cactus Pear: A Fruit of Nutraceutical and Functional Importance. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 6:9-22.
- Pimienta B. E. y Engleman (1985)** Desarrollo de la pulpa y la proporción, en volumen de los componentes del lóculo maduro en tuna (*Opuntia ficus-indica* L. Miller) *Agrociencia* 62:51-52.
- Pimienta B. E. (1990)** El nopal tunero. Universidad de Guadalajara. Guadalajara Jalisco, México. 246 p.



- Reyes A., J. A.; J. R. Aguirre R.; F. Carlín C. y A. González D. (2009)** Catálogo de las principales variantes silvestres y cultivadas de *Opuntia* en la Altiplanicie Meridional de México. UASLP, SAGARPA y CONACYT. San Luis Potosí, SLP. México. 350p.
- Rodríguez A. J. y R. Cano M. (2002)** Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Patente No. 211431.
- Sáenz-Hernández, C. (2004)** Compuestos funcionales y alimentos derivados de *Opuntia* spp. *In*: G. Esparza F., R. D. Valdés C. y S. De J. Méndez G (eds). El nopal. Tópicos de actualidad. Universidad Autónoma de Chapingo-Colegio de Postgraduados. pp. 211-222.
- Salisbury F. B. y C. W. Ross (2000)** Fisiología de las plantas 3. Desarrollo de las plantas y fisiología ambiental. International Thompson Editores Spain-Paraninfo. Traducido del original en inglés (Plant physiology, 1992) por José M. Alonso. Madrid, España. Pp 568.
- Segura J. (2008)**. Introducción al desarrollo. Concepto de hormona vegetal. *In*: Fundamentos de Fisiología Vegetal. Azcon-Bieto J. y Talon M. (eds.). McGrawhill Interamericana. Segunda edición. Madrid, España. pp 351-376.
- SIAP (2012)** Servicio de información Agroalimentaria y Pesquera, Anuario Estadístico de la producción agrícola. <http://www.siap.gob.mx> (5 de marzo 2015).
- Sudzuki F., C. Mufroz y H. Berger (1993)** El cultivo de la tuna (Cactus Pear). Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- WEISS, J., A. NERD, and Y. MIZRAHI.** "Vegetative Parthenocarpy in the Cactus Pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill". *Annals of Botany*, 72:521–526.

## VII. ANEXOS

**CUADRO A1. Tabla de análisis de varianza para la variable Longitud**

<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>A</b>	3	10883.53140	3627.84380	60.90	<.0001
<b>B</b>	3	12121.22031	4040.40677	67.83	<.0001
<b>A*B</b>	9	957.09202	106.34356	1.79	0.0704
<b>Error</b>	304	18108.17288	59.56636		
<b>Total</b>	319	42070.01662			
<b>R-Cuadrada</b>		<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Media (mm)</b>		
		0.569571	9.203173	83.86156	

Factor A= Variedad; Factor B= Concentración de AG<sub>3</sub>; A\*B= Interacción

**CUADRO A2. Tabla de análisis de varianza para la variable Diámetro**

<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>A</b>	3	1657.23667	552.41222	36.77	<.0001
<b>B</b>	3	11758.84662	3919.61554	260.89	<.0001
<b>A*B</b>	9	755.88229	83.98692	5.59	<.0001
<b>Error</b>	304	4567.36298	15.02422		
<b>Total</b>	319	18739.32855			
<b>R-Cuadrada</b>		<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Media</b>		
		0.756269	7.418040	52.25247	

Factor A= Variedad; Factor B= Concentración de AG<sub>3</sub>; A\*B= Interacción

**CUADRO A3. Tabla de análisis de varianza para la variable Peso de fruto**

<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>A</b>	3	58646.6762	19548.8921	39.56	<.0001
<b>B</b>	3	456634.5893	152211.5298	308.00	<.0001
<b>A*B</b>	9	24656.2519	2739.5835	5.54	<.0001
<b>Error</b>	304	150234.5179	494.1925		
<b>Total</b>	319	690172.0353			
<b>R-Cuadrada</b>		<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Media (g)</b>		
		0.782323	17.66424	125.8500	

Factor A= Variedad; Factor B= Concentración de AG<sub>3</sub>; A\*B= Interacción

**CUADRO A4. Tabla de análisis de varianza para la variable Peso de cáscara**

<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>A</b>	3	18294.32455	6098.10818	30.21	<.0001
<b>B</b>	3	14723.74662	4907.91554	24.31	<.0001
<b>A*B</b>	9	3266.95534	362.99504	1.80	0.0680
<b>Error</b>	304	61364.49689	201.85690		
<b>Total</b>	319	97649.52340			
<b>R-Cuadrada</b>		<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Media (g)</b>		
		0.371584	17.72302	80.16487	

Factor A= Variedad; Factor B= Concentración de AG<sub>3</sub>; A\*B= Interacción

**CUADRO A5. Tabla de análisis de varianza para la variable Peso de pulpa**

<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>A</b>	3	13377.8331	4459.2777	25.11	<.0001
<b>B</b>	3	467193.2163	155731.0721	876.82	<.0001
<b>A*B</b>	9	20901.5886	2322.3987	13.08	<.0001
<b>Error</b>	304	53993.1718	177.6091		
<b>Total</b>	319	555465.8098			
<b>R-Cuadrada</b>		<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Media (g)</b>		
		29.08293	45.82416		

Factor A= Variedad; Factor B= Concentración de AG<sub>3</sub>; A\*B= Interacción

**CUADRO A6. Tabla de análisis de varianza para la variable Grosor de cáscara**

<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>A</b>	3	58.9326109	19.6442036	17.03	<.0001
<b>B</b>	3	616.1060359	205.3686786	178.06	<.0001
<b>A*B</b>	9	25.6449528	2.8494392	2.47	0.0099
<b>Error</b>	304	350.629825	1.153388		
<b>Total</b>	319	1051.313425			
<b>R-Cuadrada</b>		<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Media (mm)</b>		
		15.91706	6.747219		

Factor A= Variedad; Factor B= Concentración de AG<sub>3</sub>; A\*B= Interacción

**CUADRO A7. Tabla de análisis de varianza para la variable Grados Brix de la pulpa**

<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>A</b>	3	19.2493438	6.4164479	4.27	0.0057
<b>B</b>	3	106.2170938	35.4056979	23.54	<.0001
<b>A*B</b>	9	58.9552812	6.5505868	4.36	<.0001
<b>Error</b>	304	457.1495000	1.5037813		
<b>Total</b>	319	641.5712188			
<b>R-Cuadrada</b>		<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Media</b>		
		0.287453	10.68980	11.47156	

Factor A= Variedad; Factor B= Concentración de AG<sub>3</sub>; A\*B= Interacción

**CUADRO A8. Tabla de análisis de varianza para la variable Grados Brix de cáscara**

<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>A</b>	3	82.4475634	27.4825211	16.51	<.0001
<b>B</b>	3	131.8357134	43.9452378	26.40	<.0001
<b>A*B</b>	9	41.5505753	4.6167306	2.77	0.0039
<b>Error</b>	304	506.0107150	1.6645089		
<b>Total</b>	319	761.8445672			
<b>R-Cuadrada</b>		<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Media</b>		
		0.335808	13.20045	9.773594	

Factor A= Variedad; Factor B= Concentración de AG<sub>3</sub>; A\*B= Interacción

**CUADRO A9. Tabla de análisis de varianza para la variable Relación pulpa/peso**

<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>A</b>	3	461.45578	153.81859	14.88	<.0001
<b>B</b>	3	29125.63047	9708.54349	938.99	<.0001
<b>A*B</b>	9	461.89779	51.32198	4.96	<.0001
<b>Error</b>	304	3143.17521	10.33939		
<b>Total</b>	319	33192.15925			
<b>R-Cuadrada</b>		<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Media (%)</b>		
0.905304		9.611095	33.45605		

Factor A= Variedad; Factor B= Concentración de AG<sub>3</sub>; A\*B= Interacción

**CUADRO A10. Tabla de análisis de varianza para la variable Relación cáscara/peso**

<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>A</b>	3	461.42484	153.80828	14.88	<.0001
<b>B</b>	3	29125.78364	9708.59455	938.97	<.0001
<b>A*B</b>	9	461.89026	51.32114	4.96	<.0001
<b>Error</b>	304	3143.24197	10.33961		
<b>Total</b>	319	33192.34072			
<b>R-Cuadrada</b>		<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Media (%)</b>		
0.905302		5.686791	56.54379		

Factor A= Variedad; Factor B= Concentración de AG<sub>3</sub>; A\*B= Interacción

**CUADRO A11. Tabla de análisis de varianza para la variable Relación Grados Brix cáscara/Grados Brix pulpa**

<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>A</b>	3	3697.261449	1232.420483	36.72	<.0001
<b>B</b>	3	359.830257	119.943419	3.57	0.0144
<b>A*B</b>	9	619.071342	68.785705	2.05	0.0339
<b>Error</b>	304	10202.40023	33.56053		
<b>Total</b>	319	14878.56328			
<b>R-Cuadrada</b>		<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Media (%)</b>		
		0.314289	8.496584	68.18205	

Factor A= Variedad; Factor B= Concentración de AG<sub>3</sub>; A\*B= Interacción

**CUADRO A12. Tabla de análisis de varianza para la variable Número total de semillas**

<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>A</b>	3	605831.4625	201943.8208	53.42	<.0001
<b>B</b>	3	10132.1375	3377.3792	0.89	0.4449
<b>A*B</b>	9	129395.1875	14377.2431	3.80	0.0001
<b>Error</b>	304	1149236.200	3780.382		
<b>Total</b>	319	1894594.988			
<b>R-Cuadrada</b>		<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Media</b>		
		0.393413	19.88151	309.2563	

Factor A= Variedad; Factor B= Concentración de AG<sub>3</sub>; A\*B= Interacción

**CUADRO A13. Tabla de análisis de varianza para la variable Peso Total de semillas**

<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>A</b>	3	58.235795	19.411932	70.11	<.0001
<b>B</b>	3	2334.888614	778.296205	2810.87	<.0001
<b>A*B</b>	9	170.541419	18.949047	68.44	<.0001
<b>Error</b>	304	84.174095	0.276888		
<b>Total</b>	319	2647.839923			

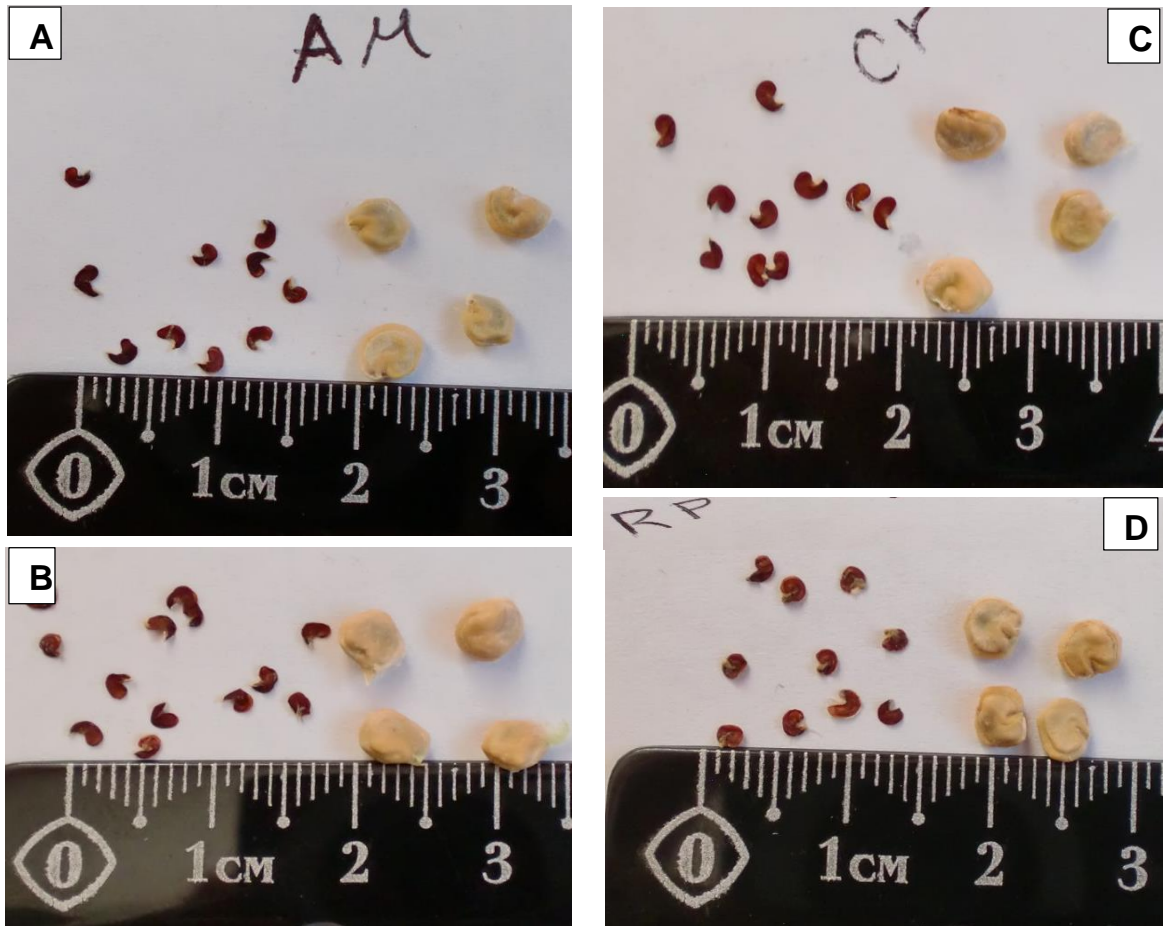
<b>R-Cuadrada</b>	<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Media (g)</b>
0.968210	31.57786	1.666363

Factor A= Variedad; Factor B= Concentración de AG<sub>3</sub>; A\*B= Interacción





**Figura A1. Fruto normal (A), fruto partenocárpico (B) de la variedad Cristalina *Opuntia albicarpa*.**



**Figura A2.** Muestra imágenes donde se compara los residuos seminales (tamaño pequeño y oscuros) extraídos de un fruto partenocárpico y semillas normales (mayor tamaño y blancas lechosas) de un fruto sin tratar en las variedades Amarilla Montesa (A), Burrón (B), Cristalina (C) y Rojo Pelón (D).

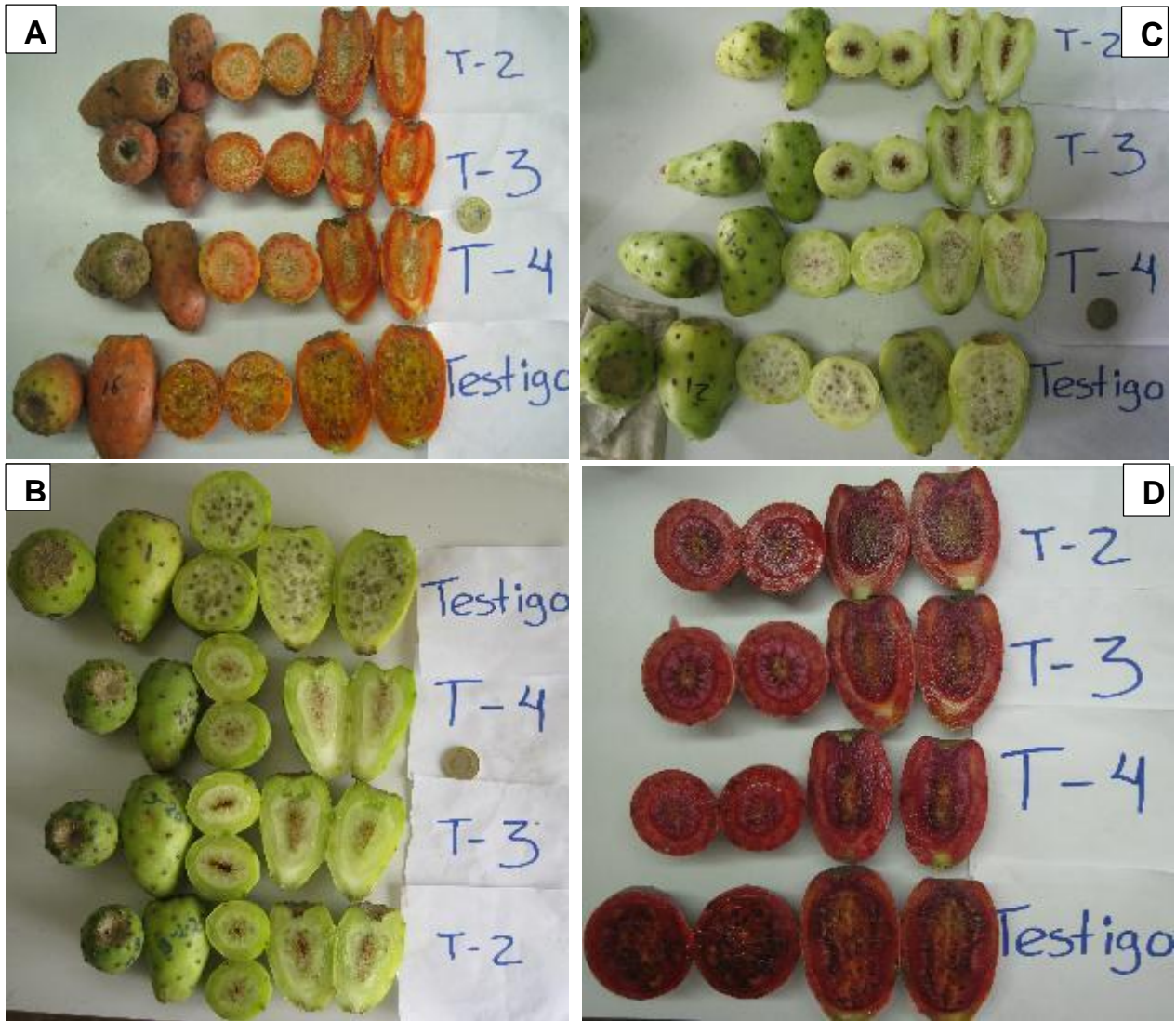


Figura A3. Características de los frutos normales (Testigo=0 ppm de  $AG_3$ ) y partenocárpicos (T-2=50, T-3=100 y T-3=200 ppm de  $AG_3$ ) en las variedades Amarilla Montesa (A), Burrona (B), Cristalina (C) y Rojo Pelón (D).