

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE ATRIBUTOS POSIBLEMENTE  
ASOCIADOS CON LA CALIDAD DEL NOPALITO  
(*Opuntia* spp. y *Nopalea* sp.)**

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

POR:  
**CRISTIAN LÓPEZ PALACIOS**

SAN LUIS POTOSÍ, S. L. P.

ABRIL DE 2008





19 de julio de 2007

AL PASANTE CRISTIAN LÓPEZ PALACIOS  
P R E S E N T E.-

En atención a su solicitud de autorización de Temario, presentada por el Dr. Juan Antonio Reyes Agüero, Asesor del Trabajo de Tesis que desarrollará usted, con el objeto de sustentar su Examen Profesional en la Licenciatura de Ing. Agroindustrial. Me es grato comunicarle que en la Sesión de Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de julio del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"EVALUACIÓN DE ATRIBUTOS POSIBLEMENTE ASOCIADOS CON LA CALIDAD DEL NOPALITO (OPUNTIA SPP. Y NOPALEA SP.)"

INTRODUCCIÓN.

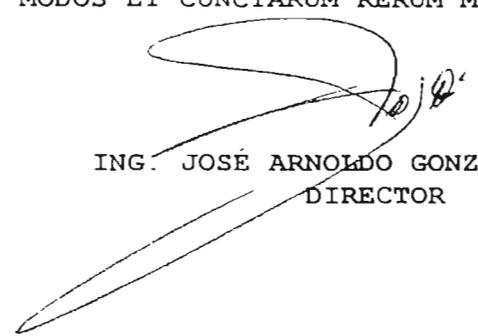
1. REVISIÓN DE LITERATURA.
2. OBJETIVOS.
3. MATERIALES Y MÉTODOS.
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFÍA

Ruego a Usted tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, debe presentar Constancia de Servicio Social como requisito indispensable para sustentar su Examen Profesional.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

  
ING. JOSÉ ARNALDO GONZÁLEZ ORTÍZ  
DIRECTOR

/bcb

El trabajo titulado "Evaluación de atributos posiblemente asociados con la calidad del nopalito (*Opuntia* spp. y *Nopalea* sp.)", fue realizado por el alumno de la carrera de Ingeniería Agroindustrial Cristian López Palacios, en el Instituto de Investigación de Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), bajo la dirección del Dr. Juan Antonio Reyes Agüero y la asesoría de la Dra. Bertha Irene Juárez Flores y el Dr. Juan Rogelio Aguirre Rivera. Se agradece la beca otorgada por el Programa Integral de Fortalecimiento Institucional de la UASLP en su modalidad del Programa de Inmersión a la Ciencia, a través del convenio C06-PIFI-11.27.48. Asimismo, el proyecto se realizó gracias al apoyo financiero otorgado por el Fondo de Apoyo a la Investigación de la UASLP (convenio C04-FAI-04.37.37); de la Comisión Nacional de Zonas Áridas y de la Fundación Produce San Luis Potosí, A. C. Se agradece de manera especial al M. en C. Hugo Magdaleno Ramírez Tobías y la participación a los "Luchadores de San José de la Peña".

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a Dios, por darme la vida, el entendimiento, la sabiduría y la inteligencia; por brindarme la oportunidad de terminar otra etapa de mi vida.

A mis Padres, por el apoyo que me han dado a lo largo de mis estudios y por estar siempre a mi lado en los momentos más importantes de mi vida.

A mis hermanos: Lulú, Julieta, Toño, Luis y Cesar, gracias por su cariño.

A mi abuelita Petra <sup>(?)</sup>, me hubiera gustado compartir el final de esta etapa contigo, pero el Señor te llamo a su presencia en el proceso de este proyecto. sé que desde ahí nos cuidas.

Gracias.

## Agradecimientos

Al Dr. Juan Antonio Reyes Agüero, por la oportunidad que me dio de participar en este proyecto, por su asesoría, sus sabios consejos y apoyo en el desarrollo del trabajo.

Al M. en C. Hugo M. Ramírez Tobías, gracias por brindarme la oportunidad de integrarme en la participación de este proyecto y tu apoyo en la fase experimental y de campo.

A la Dra. Bertha I. Juárez Flores, por su apoyo en el experimento de cuantificación de mucilago, por su asesoría en la redacción de los materiales y métodos y por sus consejos.

Al Dr. Juan Rogelio Aguirre Rivera, por su apoyo en la redacción del trabajo, especialmente en los resultados y discusión.

Al Dr. Miguel Ángel Ruiz Cabrera, por permitirnos realizar en su laboratorio algunas pruebas.

A la Dra. Laura Yañes Espinosa por toda su ayuda en la medición de cutícula y proporción de algunos artículos para la resistencia a la compresión y penetración

Al Dr. Gregorio Álvarez Fuentes por su apoyo y explicación en cuanto al diseño experimental se refiere.

Al Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, por brindarme un cubículo de estudio, así como el uso de los laboratorios para la realización del experimento; a Marylú por el préstamo del material que requerí de la biblioteca.

A mis compañeros del salón de cubículos 2: Ing. Guillermo, Haideé, Rubia, Carlin, Jessica, Margarita, Toño, Natalia, Jorge, David; gracias por su amistad.

A todas aquellas personas que de alguna manera estuvieron involucrados en el desarrollo de mis estudios profesionales.

A mi buen amigo Alejandro (Clark), gracias brother a tí y tu familia por brindarme su amistad, su consejo y confianza.

A mis amigos de la PJu, especialmente Paty, Lalo, Victor, Alessia, Cristian, Javier, Pepe, Augusto, Fátima, Pita, Ely y al P. Chuy; gracias por tener siempre un oído para escuchar, una palabra de consejo y por los momentos tan chidos que hemos compartido.

A que involuntariamente omití, muchas gracias.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Revisión de literatura.....</b>	<b>2</b>
1.1 Aspectos generales.....	2
1.2 Atributos de calidad de nopalitos.....	3
1.3 Fibra.....	4
1.4 Color.....	7
1.5 Acidez.....	9
<b>2. Objetivos.....</b>	<b>10</b>
2.1 Objetivo general.....	10
2.2 Objetivos específicos.....	10
<b>3. Materiales y métodos.....</b>	<b>11</b>
3.1 Material biológico.....	11
3.2 Diseño experimental.....	12
3.3 Resistencia a la compresión y a la penetración.....	12
3.4 Cuantificación de mucilago.....	13
3.5 Color.....	13
3.6 Acidez.....	14
<b>4. Resultados y discusión.....</b>	<b>14</b>
4.1 Caracterización general.....	14
4.2 Resistencia a la compresión.....	17
4.3 Resistencia a la penetración.....	20
4.4 Mucilago.....	22
4.5 Color.....	24
4.6 pH.....	26
<b>Conclusiones.....</b>	<b>29</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>31</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Estadios de crecimiento (cm) de nopalitos de cuatro variantes de <i>Opuntia</i> spp. y <i>Nopalea</i> sp. (Ramírez <i>et al.</i> , 2007).....	11
Cuadro 2. Caracterización general de nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento.....	15
Cuadro 3. Efecto de la especie y del estadio de crecimiento en los atributos del nopalito. Medias con letras distintas en una columna son estadísticamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). . . . .	17

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Clasificación de la fibra alimentaria, con base en Peña y Sánchez (2004).....	5
Figura 2.	Diagrama uniforme Hunter mostrando la relación de rojo/verde ( $a^*$ ) y amarillo/azul ( $b^*$ ), así como las coordenadas de luminosidad ( $L^*$ ), índice de intensidad de color ( $C^*$ ) y ángulo de tono ( $h^*$ ) (con base en MacDougall, 2002). ....	8
Figura 3.	Resistencia a la compresión longitudinal en nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento producidos en hidroponía (Noco = <i>N. cochenillifera</i> ; Robu = <i>O. robusta</i> spp. <i>larreyi</i> ; Ficu = <i>O. ficus-indica</i> ; Unxt = <i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i> ).. ..	18
Figura 4.	Resistencia a la compresión lateral en nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento producidos en hidroponía. (Noco = <i>N. cochenillifera</i> ; Robu = <i>O. robusta</i> spp. <i>larreyi</i> ; Ficu = <i>O. ficus-indica</i> ; Undu = <i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i> ). .....	19
Figura 5.	Resistencia a la penetración en nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento (Noco = <i>N. cochenillifera</i> ; Robu = <i>O. robusta</i> spp. <i>larreyi</i> ; Ficu = <i>O. ficus-indica</i> ; Unxt = <i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i> ). .. .	20
Figura 6.	Contenido de mucílago (porcentaje referido a la materia seca) en nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento (Noco = <i>N. cochenillifera</i> ; Robu = <i>O. robusta</i> spp. <i>larreyi</i> ; Ficu = <i>O. ficus-indica</i> ; Unxt = <i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i> )....	23
Figura 7.	Ángulo de tono (90° es amarillo y 180° es verde) en nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento (Noco = <i>N. cochenillifera</i> ; Robu = <i>O. robusta</i> spp. <i>larreyi</i> ; Ficu = <i>O. ficus-indica</i> ; Unxt = <i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i> ). .. .	25
Figura 8.	Intensidad de color ( $C^*$ ) en nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento (Noco = <i>N. cochenillifera</i> ; Robu = <i>O. robusta</i> spp. <i>larreyi</i> ; Ficu = <i>O. ficus-indica</i> ; Unxt = <i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i> ).....	25

	Página
Figura 9. Luminosidad o brillo ( $L^*$ ) en nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento (Noco = <i>N. cocheyllifera</i> ; Ficu = <i>O. ficus-indica</i> ; Robu = <i>O. robusta</i> spp. <i>larreyi</i> ; Unxt = <i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i> ).....	26
Figura 10. Acidez (pH) en nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento (Noco = <i>N. cocheyllifera</i> ; Ficu = <i>O. ficus-indica</i> ; Robu = <i>O. robusta</i> spp. <i>larreyi</i> ; Unxt = <i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i> ).....	27

## INTRODUCCIÓN

En las zonas secas y subhúmedas, templadas y cálidas de México, numerosas especies de los géneros *Opuntia* y *Nopalea* son muy utilizadas en la producción de nopalito para consumo humano y cladodios para forraje. En México el nopalito es un alimento tradicional, el cual se consume principalmente fresco y como parte de diversos platillos. Rodríguez y Villegas (1997) observaron que los consumidores comen nopalitos porque les gustan o por salud. Durante los últimos años, a los nopalitos se les han atribuido varias propiedades, principalmente medicinales, para aliviar problemas digestivos y coadyuvar en el tratamiento de la diabetes mellitus tipo II (Sáenz *et al.*, 2004, Paíz, 2007). Lo anterior ha propiciado un incremento en la producción y comercialización de nopalitos. A la vez, las demandas de calidad del producto han aumentado y con ello la necesidad de establecer y concretar atributos de calidad significativos y los procedimientos para evaluarlos.

Los nopalitos en su mayor parte son agua (92%) y carbohidratos, en particular fibra (4-6%), con algo de proteínas y minerales, principalmente calcio; en comparación con otros vegetales, la cantidad de fibra es relativamente alta (Rodríguez y Cantwell, 1988).

Al igual que la mayor parte de los productos alimentarios, los nopalitos se procura producirlos cumpliendo con estándares de calidad, en relación con la aceptación del consumidor. En el nopalito, la cantidad de fibra, ya sea soluble o insoluble, es posiblemente uno de los parámetros que más afectan la calidad e influyen en la aceptación del consumidor. El mucílago está en relación con la cantidad de fibra soluble. De igual manera, la resistencia a la fuerza de compresión y la resistencia a la penetración son parámetros que indican de manera indirecta la cantidad de fibra insoluble. Otro de los factores que afectan el gusto del consumidor en relación con los nopalitos, es la sensación del sabor al ingerirlos. *Opuntia* y *Nopalea* son plantas con metabolismo MAC (metabolismo ácido de las crasuláceas); una consecuencia de ello, es que la acidez de los nopalitos fluctúa en el transcurso del día (Rodríguez y Cantwell, 1988). Por ello, la acidez es uno de los parámetros importantes de calidad, en relación con la aceptación del consumidor. El color forma parte también de los parámetros de calidad visual para el consumidor; así Cantwell (1995) menciona que los nopalitos de buena calidad deben tener un color verde brillante.

Por lo anterior, se propone la evaluación de algunos parámetros posiblemente asociados con la calidad en nopalitos de *Nopalea cochenillifera* (nopal Tamazunchale),

*Opuntia robusta* spp. *larreyi* (Tapón pelón), *O. ficus-indica* (Tlaconopal) y la especie híbrida *O. undulata* x *O. tomentosa* (Valtierrilla)

## 1. REVISIÓN DE LITERATURA

### 1.1 Aspectos generales

Nopal es el nombre común que reciben en México las cactáceas de los géneros *Opuntia* y *Nopalea*. Los géneros *Opuntia* y *Nopalea* pertenecen a la tribu *Opuntiacae*, cuyas plantas son arbustivas o rastreras, con tronco bien definido o con ramas desde la base; tienen ramas globosas, claviformes, cilíndricas o aplanadas, verdes y muy carnosas llamadas cladodios (Bravo, 1978). Como ramas, los cladodios incluyen yemas axilares y pequeñas hojas, que al ser caducas, son las ramas las que realizan la función fotosintética. La formación de los nuevos cladodios se lleva a cabo a partir de un área meristemática localizada en las yemas axilares o aréolas (Bravo, 1978; Gibson y Nobel, 1986). Figueroa (1984) menciona que los nopalitos son artículos tiernos de nopal de 15 días a cuatro meses de edad, asimismo menciona que los artículos o pencas de cinco a ocho meses de edad también se venden como nopalitos, pero los campesinos los nombran renuevo. Otros autores mencionan que en dependencia del manejo agronómico, época y clima, los nopalitos requieren de 20 a 30 días de desarrollo para tener el tamaño comercial, el cual es de 10 a 26 cm de longitud en *Opuntia* y de 5 a 20 cm en *Nopalea* (Rodríguez y Cantwell, 1988; Ochoa *et al.*, 2004; Ramírez *et al.*, 2007).

Los nopalitos se componen de agua (91.8%), proteínas (1.1%), lípidos (0.2%), fibra cruda (1.1%), carbohidratos totales (4.5%), cenizas (1.3%), calcio (90 mg/100g), vitamina C (11 mg/100g) y un precursor de la vitamina A, el  $\beta$ -caroteno (30  $\mu$ g/100g) (Rodríguez y Cantwell, 1988; Cantwell, 1991). En cladodios maduros de tres especies de nopal forrajero, Pinos *et al.* (2006) registraron diferencias en materia seca (16.9-20.1%), materia orgánica (68.0-83.9%), cenizas (15.9-32.1%) y proteína cruda (1.9-4.5%); sin embargo, no encontraron diferencias significativas en fibra detergente neutro (24.7%) ni en fibra detergente ácido (17.0%). Por su parte, Ramírez *et al.* (2007) registraron en nopalitos valores de 4.5% en materia seca, 19.2% de proteína cruda, 29.5% de fibra detergente neutro y 16.3% de fibra detergente ácido. El valor de los nopalitos como alimento radica en su

elevada proporción de polisacáridos denominados estructurales o no disponibles, a los cuales pertenece el mucílago (Peña y Sánchez, 2004).

Los nopalitos han sido utilizados para la preparación de diversos platillos y como alimentos procesados. En los últimos años se han desarrollado e investigado diversas posibilidades para procesar los nopalitos, debido al gran interés de parte de los consumidores por la fibra relacionada con el control del colesterol y la prevención de algunas enfermedades, como diabetes y obesidad (Sáenz, 2000).

Las especies más utilizadas para la producción de nopalitos son: *N. cochenillifera*, *O. albicarpa*, *O. ficus-indica*, *O. fuliginosa*, *O. hyptiacantha*, *O. leucotricha*, *O. lindhemeiri*, *O. megacantha*, *O. robusta* y *O. streptacantha* (Rodríguez y Cantwell, 1988, Flores *et al.*, 2004).

### **1.2 Atributos de calidad de nopalitos**

El término de calidad alimentaria comprende un conjunto de características sensoriales, incluyendo sabor y textura, a través de la apariencia visual y beneficios nutricionales, cuyas características, reales y percibidas por el consumidor, permiten juzgar y apreciar el producto como igual, mejor o peor con respecto a otros productos similares (Waldron *et al.*, 2003). Los parámetros de calidad en nopalitos están en relación con las especies de nopal utilizado (Figuroa, 1984). En general, se ha observado que los nopalitos que tienen mayor preferencia de los consumidores y se consideran de mejor calidad son delgados, con apariencia fresca, turgentes y con un color verde brillante (Cantwell, 1995). Por su parte, Figuroa (1984) registró en la región de Zacatecas una mayor preferencia por los nopalitos de *O. leucotricha*, debido a que es un nopalito de color más claro y con mayor densidad de aréolas, lo cual al limpiarlo confiere un aspecto moteado. Sin embargo, en la región de San Luis Potosí se tiene preferencia por los nopalitos de *O. robusta* y *O. streptacantha*; de ellos el de mayor importancia es *O. robusta*, lo cual puede deberse a su agradable apariencia en forma redonda y color verde claro con tintes rojizos, además de su gran turgencia y epidermis delgada y blanca; por su rápida cocción, *O. robusta* es también la especie preferida por las empacadoras que procesan el producto (Figuroa, 1984). Algunos atributos evaluados en los nopalitos, como indicadores de calidad, son acidez,

firmeza, color, peso, longitud, fibra cruda, proteínas y cenizas (Cantwell, 1992; Cantwell, 1995; Anzures *et al.*, 2004; George *et al.*, 2004; Flores *et al.*, 2004; Ochoa *et al.*, 2004; Ramírez *et al.*, 2007).

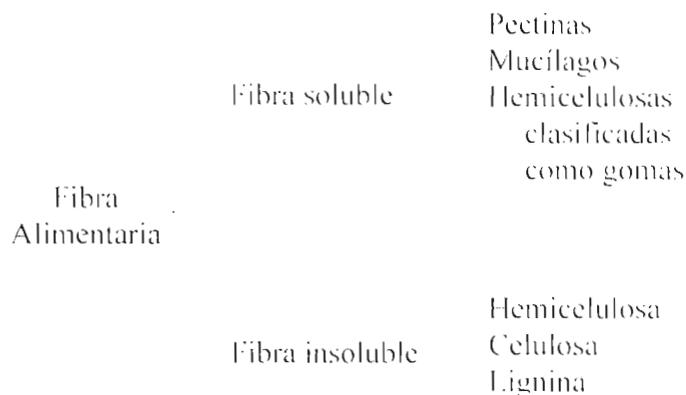
Por otro lado, los indicadores de calidad baja en nopalitas pueden ser de dos tipos: los inherentes del nopalito y los relacionados con el manejo postcosecha. En cuanto a las características indeseables propias del nopalito se encuentran nopalitas muy gruesas, la presencia de hojas, epidermis gruesa, y la presencia de gloquidios y espinas. Asimismo, el mal manejo postcosecha ocasiona una presentación poco atractiva, nopalitas quebrados, decoloraciones superficiales, deshidratación y pudriciones cuyas características son indeseables por parte del consumidor (Cantwell *et al.*, 1992, Rodríguez y Cantwell, 1988).

### 1.3 Fibra

Los polisacáridos en los alimentos se clasifican de acuerdo con su papel en la alimentación humana. Se dividen en disponibles y no disponibles para el organismo. Un término que incluye la mayoría de los polisacáridos disponibles y no disponibles es fibra dietética o fibra alimentaria (Peña y Sánchez, 2004). La fibra alimentaria se refiere a las partes de frutas, vegetales, granos, frutos secos y legumbres que no pueden ser digeridos por los humanos y que son resistentes a las enzimas digestivas (Sáenz, 1997). El contenido de fibra en los alimentos varía de acuerdo con la especie vegetal, el órgano y el estado de madurez (Sáenz, 1997). La fibra alimentaria incluye sustancias pépticas, mucílagos, hemicelulosas y celulosa, además de otros componentes como lignina y pequeñas proporciones de proteínas estructurales (Peña y Sánchez, 2004).

La fibra alimentaria se divide en dos grupos: fibra soluble y fibra insoluble en agua. Al ingerir la fibra alimentaria, la porción soluble se fermenta completamente, y de esta manera se acorta su tiempo del tránsito por el intestino (Pak, 1996, citado por Sáenz, 1997). El consumo de cantidades elevadas de fibra soluble ayuda al control de la diabetes por la disminución de la tasa de absorción de glucosa en el intestino delgado, además de ayudar a la prevención de cáncer en el tracto digestivo (Corrales *et al.*, 2004). La fibra soluble tiene la habilidad de formar geles, incluye pectinas, mucílagos y algunas hemicelulosas clasificadas como gomas. Por su parte, la fibra insoluble tiene la propiedad de retener agua

e incluye polisacáridos como hemicelulosa y celulosa, así como lignina (Figura 1) (Peña y Sánchez, 2004). En cuanto a la lignina, esta es antioxidante, debido a que inhibe la formación de radicales libres en el organismo. Por otro lado, los componentes de la lignina incrementan la excreción de esteroides y otros componentes tóxicos (Sáenz, 1997).



**Fig. 1.** Clasificación de la fibra alimentaria, con base en Peña y Sánchez (2004).

Para determinar la cantidad de fibra insoluble en los alimentos, se han desarrollado dos métodos para su extracción: fibra detergente neutro y fibra detergente ácido. La fibra detergente neutro evalúa la mayor parte del material insoluble de la célula, esto es, las paredes celulares; al agregar un detergente neutro se disuelven todos los componentes solubles, esto es, el contenido celular; dejando sólo los componentes insolubles (fibra detergente neutro), tal es el caso de hemicelulosa, celulosa y lignina, al aplicar un detergente ácido a estos componentes, se disuelve la hemicelulosa, de tal manera que sólo quedan la celulosa y la lignina (fibra detergente ácido) (García y Peña, 1995; Collins y Fritz, 2003).

Un excelente productor de fibra alimentaria son los cladodios de *Opuntia* y *Nopalea*. Se ha registrado que la edad de los cladodios tiene influencia sobre la composición química de la fibra alimentaria (Pimental, 1990; Sáenz, 1997). Pinos *et al.* (2003) encontraron un incremento en el contenido de fibra detergente neutro y ácido al incrementarse la madurez de los cladodios de nopal. Por su parte, Ramírez *et al.* (2007), en un estudio realizado en cladodios de cuatro estados de desarrollo, registraron una

disminución en el porcentaje de fibra detergente neutro y ácido en sus estadios de crecimiento intermedios pero un incremento en los siguientes estadios de crecimiento. Es decir, a mayor madurez, los nopalitos son más fibrosos debido a su mayor contenido de celulosa y lignina.

La resistencia a la penetración y la fuerza de compresión son atributos que tienen gran importancia en diversos productos vegetales de consumo humano. Estos parámetros se relacionan directamente con el contenido de fibra insoluble de los vegetales. La sensación fibrosa en el paladar es debida a la lignificación de los tejidos, por lo que la presencia de lignina es indeseable con respecto a la calidad alimentaria. En un estudio realizado en espárragos (*Asparagus officinalis*), se encontró una correlación lineal entre la máxima fuerza de penetración y el contenido de fibra total: en este caso se considero como inaceptable una fuerza de penetración mayor a 6.4 kg<sub>f</sub> (62.72 N) (Sánchez *et al.*, 1994). Sánchez *et al.* (1994) mencionan que la cantidad de fibra en el nopalito es de los parámetros que más afecta la aceptación de los consumidores, quienes rechazan lo que se considera demasiado fibroso o con fibras difíciles de ingerir. Conforme disminuye el contenido de agua, aumenta la cantidad de fibra en las hortalizas (Pinos *et al.*, 2006; Ramírez *et al.*, 2007), lo cual puede modificar el valor de la fuerza de compresión y la resistencia a la penetración.

Otro atributo que influye en la preferencia del consumidor es la cantidad de mucílago, el cual es parte de la fibra soluble (Peña y Sánchez, 2004). El mucílago es sintetizado en células especializadas: se han registrado seis estadios de desarrollo de células mucilaginosas (Trachtenberg y Fahn, 1981). El desarrollo de las células mucilaginosas en las cactáceas comienza como lo hacen el resto de las células que se desarrollan dentro del clorénquima, excepto que en este caso los cloroplastos nunca se desarrollan. Las células mucilaginosas producen muchos organelos celulares largos que sintetizan el mucílago: tales organelos están compuestos de pecíolos y membranas cortas. El mucílago se libera al exterior de la membrana plasmática, pero dentro de la pared celular, lo cual provoca que se expanda para dar espacio al mucílago (Mauseth, 1984 citado por Gibson y Nobel, 1986). Fisiológicamente, el mucílago juega un papel importante en la regulación del contenido de agua en la planta, su tolerancia a las heladas, en el metabolismo del calcio, así como en el almacenamiento de carbohidratos (Felker y Moss, 1994). Con respecto a la tolerancia a las

heladas, se ha registrado que en los espacios extracelulares y con la mediación de mucílagos, el agua causa un daño menor a la célula, ya que al formarse los cristales en el interior de la célula estos pueden romper la pared celular (Flores y Yeaton, 2003)

El mucílago de *O. ficus-indica* se compone de 24.6-42.0% de arabinosa, 24.0-40.1% de galactosa, 8.0-12.7% de ácido galacturónico, 7.0-13.1% de ramnosa y 22.0-22.2% de xylosa (Trachtenberg y Mayer, 1981). Por su parte, Peña y Sánchez (2004) mencionan que el mucílago de *Opuntia* sp. es una molécula que puede contener unas 30.000 subunidades de arabinosa (35-40%), galactosa (20-25%), ramnosa (7-8%), xylosa (7-8%) y ácido galacturónico (19-31%).

En los cladodios de nopal se registra que el contenido de mucílago puede estar influido por prácticas de cultivo, por la temperatura, así como por la disponibilidad de agua (Nobel *et al.*, 1992). Además, el contenido de mucílago se incrementa durante los periodos de sequía, posiblemente como mecanismo adaptativo (Goldstein *et al.*, 1991). Por otro lado, se observó que el mucílago extraído del cladodio varía en su viscosidad en dependencia del contenido de agua que la planta reserve. Además, la viscosidad se incrementa con el aumento de la acidez (Sáenz *et al.*, 2004). El mucílago de nopal tiene interesantes posibilidades en usos alimentarios, médicos y cosméticos. Además, tiene la capacidad para absorber grandes contenidos de agua, formando coloides viscosos o gelatinosos (Sáenz, 2000). Peña y Sánchez (2004) mencionan que la variabilidad del contenido de mucílago tiene importancia en la comercialización de las diversas variantes de nopalito, así como en la preferencia en los consumidores.

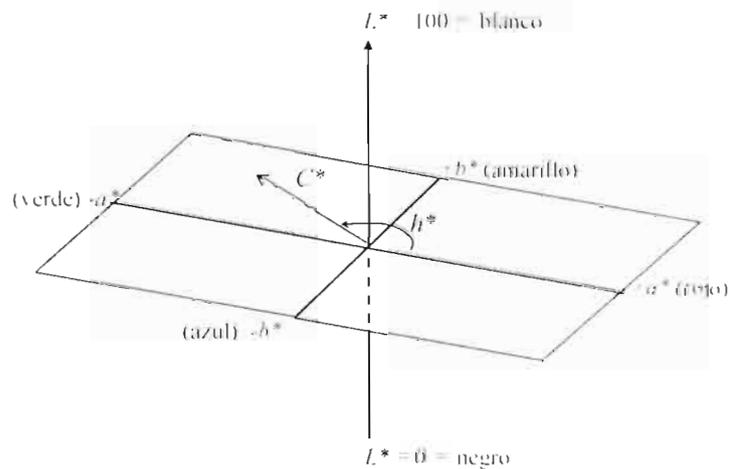
En un experimento realizado con tequezquite (álcali natural) para la conservación de color (George *et al.*, 2004), se observó que a mayor cantidad de tequezquite añadido hay menor turgencia del nopalito escaldado, así como mayor pérdida de mucílago. Luego, estos nopalitos se sometieron a un panel de consumidores, quienes mostraron mayor preferencia por los nopalitos con menor pérdida de mucílago.

#### **1.4 Color**

Según los científicos y técnicos de los alimentos, el color es uno de los factores que tiene mayor influencia en la selección y aceptación de un alimento. El color es uno de los

principales parámetros de calidad en los alimentos, además de estar asociado con la presencia de pigmentos en los tejidos (Schmalko *et al.*, 2005).

Uno de los sistemas de medición del color es el Hunter. Dicho sistema de medición del color transforma la reflexión del objeto en un espacio tridimensional, representado por medio de vectores. En la Figura 2 se observan las dimensiones de luminosidad ( $L^*$ ), de rojo/verde ( $+a^*/-a^*$ ) y de amarillo/azul ( $+b^*/-b^*$ ), cuyos valores son los componentes del vector (Figura 2). Asimismo, se observa una magnitud vectorial ( $C^*$ ), la cual es el índice de intensidad o saturación de color [ $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ ], y la dirección vectorial ( $h^*$ ), expresada como ángulo de tono [ $h^* = \arctan(b^*/a^*)$ ]. El índice de intensidad o saturación del color indica que tan saturado es el color según su posición dentro del espacio tridimensional, y es mayor conforme se aleja del punto neutro ( $a^*$  y  $b^* = 0$  y  $L^* = 50$ ) (Figura 2) (MacDougall, 2002).



**Fig. 2.** Diagrama Hunter mostrando la relación de rojo/verde ( $a^*$ ) y amarillo/azul ( $b^*$ ), así como las coordenadas de luminosidad ( $L^*$ ), índice de intensidad de color ( $C^*$ ) y ángulo de tono ( $h^*$ ) (con base en MacDougall, 2002).

En los nopalitos, el ángulo de tono de la epidermis está entre el amarillo y el verde (Anzures *et al.*, 2004). George *et al.* (2004), sometieron nopalitos procesados a un panel de consumidores, quienes mostraron mayor preferencia por los nopalitos escaldados que conservaron mejor su color. En un estudio realizado sobre la fisiología post cosecha del nopalito, se encontró que éstos pierden su apariencia brillante conforme el tiempo de almacenamiento se incrementa: con el almacenamiento la calidad visual se mantuvo como

buena, aunque la decoloración fue menor de lo considerado como pobre (Cantwell *et al.*, 1992).

### 1.5 Acidez

La acidez en el nopalito, como en otras frutas y vegetales, depende de la especie, cultivar, área de producción, tipo de metabolismo fotosintético, manejo del cultivo, así como del estado fisiológico del cultivo y la hora de cosecha (Corrales *et al.*, 2004).

En los géneros *Opuntia* y *Nopalea*, los ácidos orgánicos se acumulan en la planta debido al metabolismo ácido de las crasuláceas (MAC), con lo cual se incrementa la acidez en los tejidos durante la noche (Samish y Ellern, 1975). Estrictamente hablando, el metabolismo ácido de las crasuláceas se refiere a la habilidad del cloroplasto para realizar en la oscuridad la asimilación del bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en forma de ácido málico. Este ácido se almacena en la vacuola de la célula y es descarboxilado en el siguiente periodo de luz, y así el CO<sub>2</sub> liberado es fijado durante la fotosíntesis (Osmond, 1978). Por lo anterior, la acidez en el nopalito es más alta en la mañana, disminuye durante el día y es más baja al inicio de la noche (Nerd *et al.*, 1997).

El grado de acidez en los nopalitos es de gran importancia en la preferencia y aceptación del consumidor. Por ello, se debe tener en cuenta su estado antes de la cosecha (Anzures *et al.*, 2004; Corrales *et al.*, 2004). Se ha observado poca acidez en los nopalitos cosechados a las 13:00 h, menor que los cosechados a las 6:00 h (Corrales *et al.*, 2004).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar atributos físicos posiblemente asociados con la calidad y acidez en nopalitos de cuatro especies (*O. robusta* spp. *larreyi*, *O. ficus-indica*, *O. undulata* x *O. tomentosa* y *N. cochenillifera*) y tres estadios de crecimiento, producidos en hidroponía e invernadero.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Estimar la fuerza de resistencia a la compresión, resistencia a la penetración, el contenido de mucílago, el color y la acidez.
- Asociar la fibra detergente neutro y detergente ácido con los parámetros de firmeza y resistencia a la penetración.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio es continuación del trabajo sobre productividad primaria y calidad nutrimental de nopal (*Opuntia* spp. y *Nopalea* sp.) en condiciones intensivas, realizado por Ramírez (2006) y publicado parcialmente en Ramírez *et al.* (2007), en el cual se evaluó materia seca, proteína cruda, fibra detergente neutro, fibra detergente ácido, cenizas y la productividad en hidroponía. Para ambos trabajos, los nopalitos se obtuvieron de plantas creciendo en un medio hidropónico, en el invernadero de la comunidad de San José de la Peña, anexa al Ejido Zaragoza de Solís, municipio de Villa de Guadalupe, S. L. P. (Ramírez *et al.*, 2007). El autor de la presente memoria de tesis participó como asistente de investigación en el desarrollo de todo el experimento en San José de la Peña.

#### 3.1 Material biológico

Se evaluaron cuatro especies destacadas como productoras de brotes vegetativos utilizados como nopalitos: *N. cochenillifera* (Nopal Tamazunchale) procedente de la Huasteca Potosina; *O. robusta* spp. *larreyi* (Tapón pelón) del Altiplano Potosino; *O. ficus-indica* (Tlaconopal) de la colección del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), y la especie híbrida *O. undulata* x *O. tomentosa* (Valtierrilla) cultivada en Salamanca, Gto. En el resto del trabajo se denominarán en forma general como especies. Los brotes se cosecharon al alcanzar cada uno un estadio de crecimiento (EC) según la especie y el tratamiento correspondiente (Cuadro 1) (Ramírez *et al.*, 2007). La cosecha se llevó a cabo entre las 13:00 y las 14:00 h

**Cuadro 1.** Estadios de crecimiento (cm) de nopalitos de cuatro variantes de *Opuntia* spp. y *Nopalea* sp. (Ramírez *et al.*, 2007).

Estadio de crecimiento	Especie			
	<i>N. cochenillifera</i>	<i>O. robusta</i> spp. <i>larreyi</i>	<i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i>	<i>O. ficus-indica</i>
EC1	6±1.5	8±1.5	8±1.5	10±1.5
EC2	12±1.5	17±1.5	16±1.5	20±1.5
EC3	17±1.5	25±1.5	24±1.5	31±1.5

### 3.2 Diseño experimental

Para el experimento se empleó el diseño de bloques completos al azar, con un arreglo factorial de tratamientos (12), con cuatro repeticiones. Los factores (y niveles) son la especie de nopal (cuatro) y el estadio de crecimiento (tres). Se evaluaron en total 48 unidades experimentales. Los análisis de laboratorio se realizaron por triplicado y se hizo el cálculo del promedio para cada unidad experimental. Se utilizó el procedimiento GLM y la prueba de comparación de medias LSMEANS del programa SAS. El modelo estadístico empleado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \rho_i + \alpha_j + \gamma_k + (\alpha\gamma)_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

$Y_{ijk}$ , es el valor observado de la variable en estudio.

$\mu$ , es la media de los tratamientos.

$\rho_i$ , es el efecto del bloque al  $i$ -ésimo nivel.

$\alpha_j$ , es el efecto del factor A al  $j$ -ésimo nivel.

$\gamma_k$ , es el efecto del factor B al  $k$ -ésimo nivel.

$(\alpha\gamma)_{jk}$ , es la interacción de los factores A y B

$\varepsilon_{ijk}$ , es el error aleatorio.

### 3.3 Resistencia a la compresión y a la penetración

La estimación de la fuerza de resistencia a la compresión y a la penetración se llevó a cabo en la Planta Piloto de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP al día siguiente de la cosecha. Ambas evaluaciones se realizaron con una máquina universal de pruebas (Instron<sup>®</sup> modelo 1000, EE. UU.). La resistencia a la penetración se determinó en la base, centro y ápice de los nopalitos con un punzón de 15 mm de diámetro a una velocidad de 100 mm/min (Rodríguez y Villegas, 1997; Guevara *et al.*, 2003; Anzures *et al.*, 2004). Con estos datos se obtuvo un promedio por cada nopalito. La fuerza de compresión se evaluó como la fuerza necesaria para doblar un 18.5% la longitud (compresión longitudinal) y 18.5% la anchura (compresión lateral) de cada nopalito (Rodríguez y Villegas, 1997).

### 3.4 Cuantificación de mucilago

Para el contenido de mucilago las muestras de nopalitos se cortaron en trozos pequeños, se conservaron en bolsas dentro de una hielera con gel refrigerante durante su transporte, y se conservaron a  $-20^{\circ}\text{C}$  en el laboratorio. Posteriormente, se liofilizaron (ilShin® Europe modelo TFD5505, Países Bajos) y se trituraron en mortero en el Laboratorio de Ingeniería de los Alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP.

La extracción del mucilago se llevó a cabo en los laboratorios del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas de la UASLP, de acuerdo con el procedimiento desarrollado por Peña y Sánchez (2004). Para ello se colocó 1 g de muestra liofilizada en un tubo de ensaye con 10 ml de agua y se calentó en baño maría durante 15 minutos. Luego, se centrifugó (Termo IEC Modelo 120, EE.UU.) a 3500 rpm por 15 min y el sobrenadante se pasó a otro tubo de ensaye. Se resuspendió el precipitado con 5 ml de agua caliente y se centrifugó nuevamente. Posteriormente, por cada parte de extracto se adicionaron cuatro partes de etanol acidificado a un pH de 5.8 y se refrigeró durante 24 h; a continuación se centrifugó durante 15 minutos hasta que el sobrenadante fue transparente. Para eliminar los residuos de etanol, se deshidrató en estufa a  $85^{\circ}\text{C}$  hasta peso constante. El residuo obtenido se cuantificó como porcentaje de mucilago por gramo de materia seca.

### 3.5 Color

El color se determinó al día siguiente de la cosecha en el Laboratorio de Ingeniería de los Alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP, con el sistema Hunter. La medición se llevó a cabo en el ápice, centro y base del nopalito, para lo cual se utilizó un colorímetro Hunterlab (AccuProbe<sup>TM</sup> modelo HH06, EE.UU.). Se obtuvieron los valores de luminosidad ( $L^*$ ), de la dimensión rojo-verde ( $a^*$ ) y de la dimensión amarillo-azul ( $b^*$ ), se obtuvo un promedio por nopalito de estas tres mediciones y se calculó el ángulo de tono [ $h^* = \arctan(b^*/a^*)$ ] e índice de intensidad de color [ $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{0.5}$ ] (Sáenz, 2000; MacDougall, 2002; Stintzing *et al.*, 2005).

### 3.6 Acidez

La acidez se determinó como pH, el cual se evaluó *in situ* con un potenciómetro portátil (Oakton<sup>®</sup>, Singapur) para lo cual se introdujeron el electrodo de vidrio y el sensor de temperatura en una incisión de un trozo del nopalito (Flores *et al.*, 2004). Las mediciones se efectuaron entre las 13:00 y 14:00 horas (Corrales *et al.*, 2004)

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Caracterización general

Los nopalitos presentaron, variaciones en los atributos medios estimados entre especies y estadios de crecimiento, así como entre los estadios de crecimiento dentro de cada especie. En relación con la resistencia a la compresión longitudinal y lateral, se obtuvieron valores promedio de  $2.83 \pm 2.69$  N y  $8.66 \pm 6.69$  N, respectivamente. En la resistencia a la compresión longitudinal, los valores por especie variaron de 1.40 N para *O. undulata* x *O. tomentosa* a 5.20 N en *O. robusta* spp. *larreyi*, y en la resistencia a la compresión lateral, los nopalitos requirieron una fuerza de 5.51 N en *O. undulata* x *O. tomentosa* a 12.22 N en *O. ficus-indica*. En cuanto a la resistencia a la penetración, en promedio las cuatro especies evaluadas requirieron de  $2.63 \pm 0.55$  N, con variación de 2.39 N en *O. robusta* spp. *larreyi* hasta 2.91 N en *O. ficus-indica*. Para el contenido de mucílago, en promedio las cuatro especies presentaron  $6.85 \pm 1.64\%$  por gramo de materia seca, con una variación de 5.34% en *O. ficus-indica* hasta 8.27% en *N. cochenillifera* (Cuadro 2).

El ángulo de tono para las cuatro especies evaluadas se situó entre el verde y amarillo, con valores promedio de  $113.05 \pm 3.02^\circ$ ; este ángulo fluctuó de  $111.14^\circ$ , para *N. cochenillifera* (su tono verde es más pálido y tiende más al amarillo), a  $114.15^\circ$ , en *O. robusta* spp. *larreyi* (su tono verde tiende ligeramente menos al amarillo). El índice de intensidad de color promedio para las cuatro especies fue de  $24.37 \pm 6.33$ , con amplitud desde 20.46 en *O. ficus-indica* a 30.18 en *N. cochenillifera*, y el brillo o luminosidad, en promedio fue de  $40.78 \pm 3.45$  con una amplitud de 38.96 para *O. ficus-indica* a 43.20 para *N.*

*cochenillifera*. La acidez presentó un pH promedio de  $4.57 \pm 0.28$ , con una variación de 4.47 para *O. undulata* x *O. tomentosa*, hasta 4.77 en *N. cochenillifera* (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Caracterización general de nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento.

EC <sup>1</sup>	Atributo							
	Compresión (N)			Muc <sup>5</sup> (%)	Color			pH
	Long <sup>2</sup>	Lat <sup>3</sup>	Pen <sup>4</sup> (N)		<i>H</i> <sup>6*</sup>	<i>C</i> <sup>7*</sup>	<i>L</i> <sup>8*</sup>	
<i>Nopalca cochenillifera</i>								
EC1	3.83	5.30	2.81	9.15	109.67	33.04	45.00	4.82
EC2	2.24	6.00	2.67	8.01	111.16	30.49	43.59	4.65
EC3	2.52	10.70	2.88	7.66	113.41	25.28	39.87	4.84
Media	2.94	6.77	2.77	8.27	111.14	30.18	43.20	4.77
<i>Opuntia ficus-indica</i>								
EC1	2.75	9.69	2.83	5.31	111.50	25.63	40.35	4.67
EC2	1.16	8.23	2.60	6.47	113.10	22.94	39.25	4.24
EC3	2.69	20.66	3.48	4.46	115.54	16.63	35.50	4.45
Media	2.19	12.22	2.91	5.34	112.90	20.46	38.96	4.52
<i>Opuntia robusta</i> spp. <i>larreyi</i>								
EC1	4.35	5.89	2.25	7.65	110.89	27.82	40.69	4.61
EC2	4.70	9.54	2.18	7.59	114.73	19.77	41.53	4.60
EC3	7.84	16.84	2.93	5.04	118.72	12.08	40.86	4.72
Media	5.20	10.70	2.39	6.76	114.15	21.13	41.05	4.63
<i>Opuntia undulata</i> x <i>O. tomentosa</i>								
EC1	1.31	2.20	2.50	5.38	112.70	25.67	40.63	4.70
EC2	0.89	4.22	2.26	7.01	113.11	25.12	41.69	4.13
EC3	1.98	10.58	2.81	8.76	115.08	21.35	37.91	4.50
Media	1.40	5.51	2.52	6.93	113.51	24.26	40.20	4.17
M.G. <sup>9</sup>	2.83	8.66	2.63	6.85	113.05	24.37	40.78	4.57
$\sigma$ <sup>10</sup>	2.69	6.69	0.55	1.64	3.02	6.33	3.45	0.28

<sup>1</sup>EC = estadio de crecimiento, <sup>2</sup>Long = resistencia a la compresión longitudinal expresada en Newtons (N), <sup>3</sup>Lat = resistencia a la compresión lateral en N, <sup>4</sup>Pen = resistencia a la penetración en N, <sup>5</sup>Muc = contenido de mucilago expresado en porcentaje referido a la materia seca, <sup>6</sup>H\* = ángulo de tono (siglas por su nombre en inglés, hue) expresado en grados, <sup>7</sup>C\* = índice de intensidad de color (por su nombre en inglés, chroma) expresado en unidades adimensionales, <sup>8</sup>L\* = luminosidad o brillo expresado en unidades adimensionales; <sup>9</sup>M.G. = media general, <sup>10</sup> $\sigma$  = desviación estándar

Como se puede observar, los nopalitos presentaron una mayor resistencia a la compresión lateral que a la longitudinal, sin considerar estadio de crecimiento ni especie. Asimismo, se observó que los nopalitos incrementan su resistencia a la compresión lateral y

a la penetración conforme avanzan en su desarrollo. En general, los nopalitos presentaron valores menores que los registrados por Rodríguez y Villegas (1997) para resistencia a la compresión y resistencia a la penetración. Estos valores menores posiblemente fueron causados por las condiciones en que se desarrollaron los nopalitos, con abasto continuo de agua a la planta, en tanto que las estimaciones de Rodríguez y Villegas (1997), los cuales se obtuvieron en condiciones de campo. Dicho abasto continuo de agua pudo causar un decremento en la resistencia a la compresión y en la resistencia a la penetración, mientras que posiblemente los nopalitos producidos en el campo desarrollan fibras más resistentes.

Al realizar un análisis de correlación entre la fibra detergente ácido, obtenida por Ramírez *et al.* (2007), y la resistencia a la compresión lateral y a la penetración, se obtuvo una correlación positiva y altamente significativa, lo cual indica que ambos atributos se relacionan con el contenido de lignina y celulosa presentes en las paredes celulares.

El contenido de mucílago fue similar al registrado por otros autores (Nerd *et al.*, 1997; Peña y Sánchez, 2004; Sáenz *et al.*, 2004). Las variaciones entre las especies y estadios de crecimiento se relacionan con el pH y la disponibilidad de agua en la planta (Medina *et al.*, 2003; Sáenz *et al.*, 2004), ya que los valores registrados para este caso, en cuanto a mucílago se refiere, fueron mayores en los nopalitos de aquellas especies que tuvieron un pH mayor; además, se ha registrado que en condiciones de sequía hay un incremento en la producción de mucílago en los cladodios del nopal (Sáenz *et al.*, 2004). En cuanto al pH, en general se observó que este fue similar al registrado por otros autores (Rodríguez y Cantwell, 1988; Ochoa *et al.*, 2004). Asimismo, Rodríguez y Villegas (1988) señalan que hay una disminución del pH al incrementarse su estadio de crecimiento; sin embargo, se observó que en algunas especies hay una disminución del pH en el estadio de crecimiento 2 y un incremento en el estadio de crecimiento 3. Posiblemente esto se debió a la disposición de agua en la planta, ya que se pudo modificar el pH de los nopalitos para inhibir al ácido absícico y permitir su desarrollo (Nieddu *et al.*, 1997; Thompson *et al.*, 1997), o pudo haber sido causado por un cambio en la ruta metabólica (CAM por C<sub>3</sub>) de los nopalitos (Black, 1973 citado por Samish y Ellern, 1975; Cushman, 2001; Pimienta *et al.*, 2005).

Para el color, se observó que hay un incremento del ángulo de tono y una

disminución del índice de intensidad del color y luminosidad conforme avanzaba el desarrollo del cladodio en las especies evaluadas. Dichos cambios en el ángulo de tono e intensidad del color posiblemente se relacionen con el incremento de clorofila y de cloroplastos (Gibson y Nobel, 1986; Whatley, 1992; Ladygin *et al.*, 2004). Asimismo, la disminución en los valores del índice de intensidad de color y luminosidad posiblemente sean causados por la presencia y desarrollo de cutícula y de pubescencia en los nopalitos

**Cuadro 3.** Efecto de la especie y del estadio de crecimiento en los atributos del nopalito. Medias con letras distintas en una columna son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ).

Factor	Atributo							
	Compresión (N)		Pen <sup>3</sup> (N)	Muc <sup>4</sup> (%)	Color			pH
Long <sup>1</sup>	Lat <sup>2</sup>	<i>h</i> <sup>5</sup>			<i>C</i> <sup>6</sup>	<i>L</i> <sup>7</sup>		
	Especie							
Noco <sup>8</sup>	2.94b	6.77b	2.77a	8.27a	111.14c	30.18a	43.20a	4.77a
Ficu <sup>9</sup>	2.19bc	12.22a	2.91a	5.34c	112.90b	20.46c	38.96c	4.52bc
Robu <sup>10</sup>	5.20a	10.70a	2.39b	6.76b	114.15a	21.13c	41.05b	4.63ba
Unxt <sup>11</sup>	1.40c	5.51b	2.52b	6.93b	113.51ab	24.26b	40.20b	4.47c
	Estadio de crecimiento							
EC1	2.88ab	5.72b	2.58b	6.87a	111.30c	27.73a	41.49a	4.69a
EC2	2.32b	6.80b	2.41c	7.31a	113.16b	24.23b	41.48a	4.43b
EC3	3.44a	14.62a	3.00a	6.36a	115.67a	19.20c	38.61b	4.63a
	Significación							
EE <sup>12</sup>	0.2	0.49	0.03	0.22	0.16	0.34	0.19	0.02
SP <sup>13</sup>	**	***	***	***	***	***	***	***
EC <sup>14</sup>	***	***	***	NS	***	***	***	***
SP*EC <sup>15</sup>	*	*	***	***	***	***	***	***

<sup>1</sup>Long = resistencia a la compresión longitudinal expresada en Newtons (N), <sup>2</sup>Lat = resistencia a la compresión lateral en N, <sup>3</sup>Pen = resistencia a la penetración en N, <sup>4</sup>Muc = contenido de mucilago expresado en porcentaje referido a la materia seca, <sup>5</sup>*h* = ángulo de tono (siglas por su nombre en inglés, hue) expresado en grados, <sup>6</sup>*C* = índice de intensidad de color (por su nombre en inglés, chroma) expresado en unidades adimensionales, <sup>7</sup>*L* = luminosidad o brillo expresado en unidades adimensionales, <sup>8</sup>Noco = *N. cochinchinensis*, <sup>9</sup>Ficu = *O. ficus-indica*, <sup>10</sup>Robu = *O. robusta* spp. *karreyi*, <sup>11</sup>Unxt = *O. undulata* x *O. tomentosa*, <sup>12</sup>EE = error estándar, <sup>13</sup>SP = especie, <sup>14</sup>EC = estadio de crecimiento, <sup>15</sup>SP\*EC = interacción especie\*estadio de crecimiento

\*\*\*,  $p \leq 0.001$ ; \*\*,  $p \leq 0.01$ ; \*,  $p \leq 0.05$ ; NS,  $p \geq 0.05$

#### 4.2 Resistencia a la compresión

De acuerdo con la prueba del análisis de varianza, en la resistencia a la compresión longitudinal y lateral, la interacción especie\*estadio de crecimiento fue estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ) (Cuadro 3). Es decir, la fuerza requerida para flexionar los nopalitos

de las cuatro especies evaluadas depende del estado de desarrollo en el cual se encuentren los mismos (Figura 3).

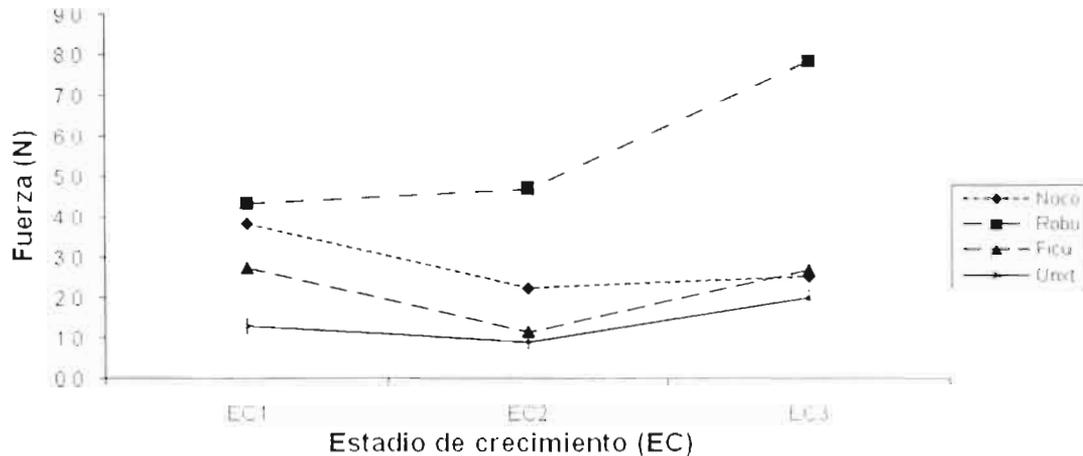


Fig. 3. Resistencia a la compresión longitudinal en nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento producidos en hidroponía (Noco = *N. cochinchinensis*, Robu = *O. robusta* spp. *larreyi*, Ficu = *O. ficus-indica*, Uret = *O. undulata* x *O. tomentosa*)

En la Figura 3 se observa que los nopalitos de *O. robusta* spp. *larreyi* registraron mayor resistencia a la fuerza de compresión longitudinal a partir del EC2. Mientras los nopalitos de las otras especies evaluadas no requirieron mayor fuerza para doblarse longitudinalmente conforme se desarrollaban, los de *O. robusta* spp. *larreyi* incrementaron su resistencia a la flexión longitudinal ( $p < 0.05$ ) con la madurez y los superaron en resistencia en los tres EC. En general, la resistencia a la compresión puede estar relacionada con el acomodo de las fibras asociadas a los haces vasculares, los cuales van de un margen a otro del cladodio en forma diagonal formando una red, pues se entrecruzan y entre ellos forman espacios en forma rómbica más largos que anchos (ocupados por células suaves del parénquima no lignificado) (Gibson y Nobel, 1986).

En general, los nopalitos de *O. robusta* spp. *larreyi* tienden a ser más circulares, y por lo tanto con una mayor relación ancho:largo (0.66). Tal relación, puede indicar que sus fibras forman redes menos largas comparadas con las otras especies evaluadas. Así al aplicar una fuerza de compresión, longitudinal o lateral, las redes fueron disminuyendo su longitud o anchura, de tal manera que las fibras que conforman las redes al irse agrupando, pudieron generar mayor resistencia a la compresión. En cuanto a resistencia a la

compresión lateral. en los nopalitas EC1 y EC2 de las cuatro especies fue similar estadísticamente ( $p < 0.05$ ); a la vez. los nopalitas EC3 de las cuatro especies requirieron de mayor fuerza para doblarse lateralmente (Figura 4).

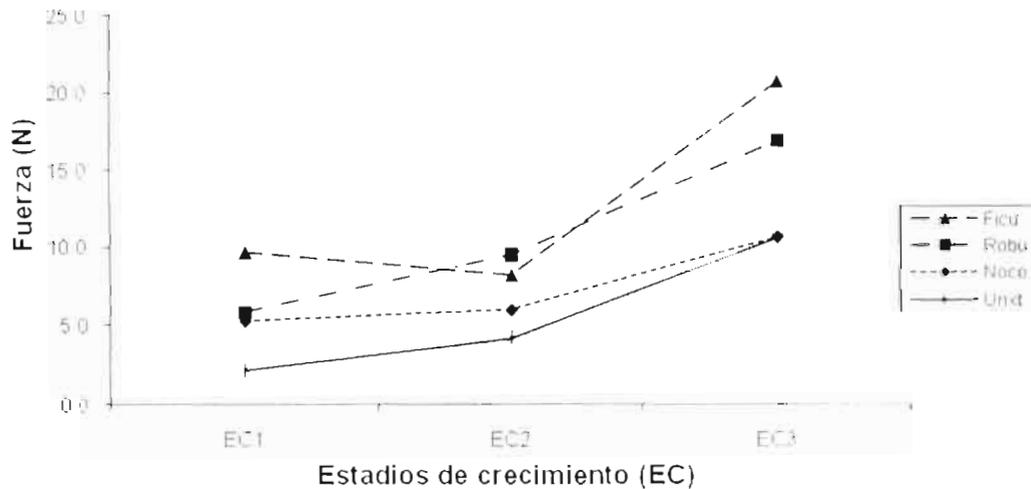


Fig. 4. Resistencia a la compresión lateral en nopalitas de cuatro especies y tres estadios de crecimiento producidos en hidroponia (Noco = *N. cochinchinensis*, Robu = *O. robusta* spp. *larreyi*, Ficu = *O. ficus-indica*, Unct = *O. undulata* x *O. tomentosa*)

La resistencia a la compresión puede depender de la turgencia del nopalito: sin estrés hídrico, las células del parénquima se llenan de agua, se vuelven más turgentes (Gibson y Nobel, 1986) y a la vez, más resistentes. En efecto, cuando los cladodios maduros en la planta están turgentes, pueden soportar más de 10 frutos, cada uno hasta de 200 g (Wessels y Swart, 1990), pero si los cladodios tienen algún grado de deshidratación, se doblan por efecto del peso de los frutos. Sin embargo, Gibson (1997) señala que lo doblegable de los cladodios jóvenes puede deberse al poco desarrollo del xilema. En un estudio realizado por Rodríguez y Villegas (1997) con nopalitas de *O. ficus-indica* de 20 cm (equivalentes al EC3 de esta memoria de tesis), cosechados en el campo, se registró una amplitud en resistencia a la fuerza de compresión (longitudinal y lateral) de 21.8 a 30.0 N, muy superior a la registrada al respecto en el presente estudio (2.69 a 20.66 N). La mayor resistencia de estos nopalitas producidos en el campo, sin abasto continuo de agua y con mayores tensiones mecánicas, puede deberse a que las fibras asociadas a sus haces vasculares son más robustas que las de los nopalitas cultivados con alta disponibilidad de agua y en el ambiente protector del invernadero.

Asimismo, se encontró una correlación positiva y significativa entre los valores obtenidos en este trabajo de tesis sobre resistencia a la compresión lateral, y los datos de fibra detergente ácido obtenidos por Ramírez *et al.* (2007). Tal correlación puede deberse a que con el incremento del EC aumenta el contenido de celulosa y lignina de los tejidos vasculares, lo cual explica el incremento en la fuerza requerida para doblar los nopalitos lateralmente.

### 4.3 Resistencia a la penetración

En cuanto a la resistencia a la penetración que presentaron los nopalitos, la interacción estadísticamente significativa especie\*estadio de crecimiento ( $p<0.001$ ) (Cuadro 3), indica que el estado de madurez de los nopalitos, al igual que la especie, influyeron en la fuerza que se requirió para ser penetrados (Figura 5). Los nopalitos EC1 y EC2 de *O. ficus-indica* y *N. cochenillifera* destacaron por su similitud ( $p<0.05$ ) al presentar mayor resistencia a la penetración, seguidos por los nopalitos de *O. undulata* x *O. tomentosa* y finalmente por los de *O. robusta* spp. *larreyi*, los cuales fueron los menos resistentes a la penetración en dichos estadios. Los nopalitos EC3 de *O. ficus-indica* fueron los más resistentes a la penetración ( $p<0.05$ ) y los de las otras especies, fueron estadísticamente iguales entre sí ( $p<0.05$ ) (Figura 5).

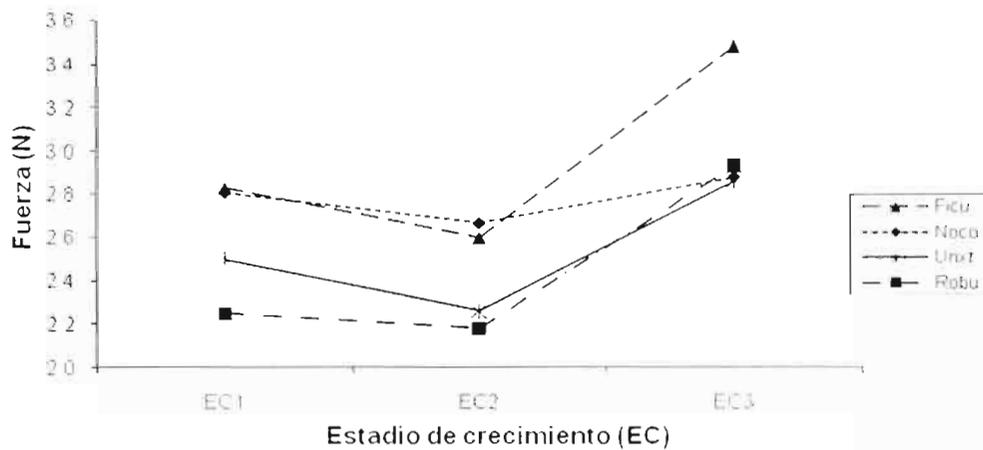


Fig. 5. Resistencia a la penetración en nopalitos de cuatro especies x tres estadios de crecimiento (Noco = *N. cochenillifera*, Robu = *O. robusta* spp. *larreyi*, Ficu = *O. ficus-indica*, Unxt = *O. undulata* x *O. tomentosa*)

Así, los nopalitos de *O. ficus-indica* destacaron por su dureza o resistencia a la penetración en los tres estadios de crecimiento pero particularmente en el EC3 (Figura 5). En contraste, los nopalitos de *N. cochenillifera* presentaron resistencia relativamente alta y estadísticamente igual ( $p < 0.05$ ) en los tres EC (Figura 5). Además, se observó que los nopalitos EC1 y EC2 de *O. ficus-indica*, *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. robusta* spp. *larreyi* presentaron resistencia similar ( $p < 0.05$ ), la cual se incrementó en los EC3, posiblemente por incremento de celulosa y lignina (García y Peña, 1995).

Ramírez *et al.* (2007), registraron un incremento en el contenido de fibra detergente ácido al pasar los nopalitos del EC2 al EC3. Al correlacionar los datos de resistencia a la penetración con dichos datos de fibra detergente ácido (Ramírez *et al.*, 2007), se encontró una correlación positiva y significativa ( $p < 0.01$ ) entre ambos atributos. Dicha correlación sugiere que la resistencia a la penetración que oponen los nopalitos depende en gran medida del contenido de celulosa y lignina. En efecto, Guevara *et al.* (2003) observaron en nopalitos de *O. ficus-indica*, una reducción en la resistencia a la penetración, conforme disminuía el contenido de fibra cruda (lignina, la mayor parte de la celulosa y en algunos casos, una pequeña porción de las hemicelulosas, según García y Peña, 1995).

La resistencia a la penetración también podría depender del estado de las células que componen la hipodermis (colénquima), ya que estas células son capaces de almacenar agua, lo que las hace más turgentes (Gibson y Nobel, 1986) y menos resistentes a la penetración. Rodríguez y Villegas (1997) encontraron en nopalitos oreados por estar en anaquel, mayor resistencia a la penetración. En efecto, el agua almacenada en la planta provoca una disminución en la resistencia a la penetración, ya que las células se hacen más turgentes y menos flexibles (Gibson y Nobel, 1986). Asimismo, el grosor de la cutícula también podría influir en la fuerza necesaria para penetrar los nopalitos.

Con la finalidad de observar el posible efecto de la cutícula sobre la resistencia a la penetración, se midió su grosor en cladodios de un año de edad de las especies evaluadas. Asimismo, se observó la distribución de la celulosa y lignina al teñir con verde rápido y safranina, respectivamente. Al realizar las mediciones en microscopio, se registró que *N. cochenillifera* presentó la cutícula más delgada ( $3.97 \mu\text{m}$ ), y *O. ficus-indica* la más gruesa ( $17.45 \mu\text{m}$ ). De igual manera, *N. cochenillifera* presentó mayor superficie de tinción con

safranina (rojo) que las otras tres especies, las cuales presentaron mayor tinción con verde rápido. Tales observaciones sugieren que la mayor resistencia a la penetración que se registró para *N. cochenillifera* puede deberse a su alto contenido de lignina, y que en *O. ficus-indica* su mayor resistencia pudo deberse al gran grosor de su cutícula. En efecto, Ramírez y Pimienta (1995) mencionan un incremento en la cutícula para aquellas especies que se desarrollan en condiciones de mayor aridez, tal es el caso de *O. ficus-indica* que procede de una región con clima templado subhúmedo con verano fresco y largo (Ramírez, 2006). También se observó un alto contenido de cristales de oxalato de calcio (drusas) alineados entre la epidermis y el colénquima, los cuales podrían influir en la resistencia a la penetración (comunicación personal de la Dra. Laura Yáñez E.).

Los valores de resistencia a la penetración obtenidos en el presente trabajo fueron menores que los registrados en nopalitos desarrollados sin riego (Rodríguez y Villegas, 1997; Guevara *et al.*, 2003); así, en concordancia con lo expresado en los párrafos anteriores, las diferencias encontradas con estos estudios están probablemente relacionadas con el contenido y disponibilidad de agua en las plantas madre de los nopalitos.

Como parámetro de calidad, la resistencia a la penetración ha sido evaluada en otros vegetales, principalmente en espárragos, donde se ha determinado como aceptable por el consumidor un valor menor que 62 N (Sharma y Wolfe, 1975). Con base en lo anterior, las cuatro especies y sus tres estadios de crecimiento se podrían considerar como "aceptables" en cuanto a este atributo de calidad se refiere.

#### **4.4 Mucilago**

Sin distinción de EC, los nopalitos de *N. cochenillifera* presentaron el mayor ( $p < 0.05$ ) porcentaje de mucilago, seguidos sin diferencias entre sí ( $p > 0.05$ ), por los de *O. robusta* spp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa*; con el menor contenido de mucilago resultaron los nopalitos de *O. ficus-indica*. Sin distinción de especies, los EC carecieron de diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) (Cuadro 3).

La interacción entre los factores especie\*estadio de crecimiento fue significativa ( $p < 0.05$ ) (Cuadro 3); es decir, el contenido de mucilago presente en los nopalitos depende

del estadio de crecimiento y de la especie evaluada (Figura 6). Así, se observó que el contenido de mucilago de las especies de los géneros *Opuntia* fue similar al registrado en otros estudios (Peña y Sánchez, 2004; Sáenz *et al.*, 2004); sin embargo, cada una de ellas presentó un patrón diferente (Figura 6).

Como se puede apreciar en la Figura 6, sólo los nopalitos de *O. undulata* x *O. tomentosa* presentaron un incremento lineal con la edad en el contenido de mucilago. En cuanto a las otras especies evaluadas, los nopalitos de *O. ficus-indica* registraron el menor contenido de mucilago ( $p < 0.05$ ) en sus tres estadios de crecimiento. Cabe destacar que el mucilago de los nopalitos EC2 y EC3 de *O. robusta* spp. *larreyi* y los de *O. ficus-indica* fuer similar estadísticamente, pero que en ambas especies disminuyó su contenido en el EC3. Esta disminución pudo deberse al aumento de la proporción parénquima/clorénquima y del contenido de fibra (Rodríguez y Cantwell, 1988), lo cual no tendría que presentarse en *O. undulata* x *O. tomentosa*.

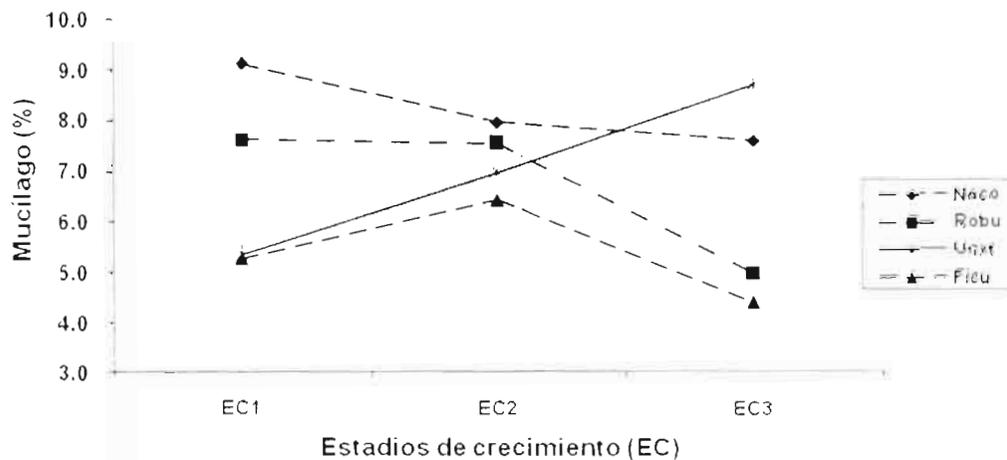


Fig. 6. Contenido de mucilago (porcentaje referido a la materia seca) en nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento (Noco = *N. cochenillifera*, Robu = *O. robusta* spp. *larreyi*, Ficu = *O. ficus-indica*, Uxt = *O. undulata* x *O. tomentosa*)

Los nopalitos de *N. cochenillifera* presentaron cantidades de mucilago menores a los registrados por Nerd *et al.* (1997), y sin diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) durante su desarrollo (Figura 6). En el estudio realizado por Ramírez *et al.* (2007) los nopalitos de *N. cochenillifera* presentaron el mayor contenido de fibra insoluble; además, los mismos autores registraron un decremento de fibra detergente ácido partir del EC2. En otros

estudios realizados (García, 2007; Peña y Sánchez, 2004) se ha registrado que los nopalitos presentan poco contenido de fibra insoluble en contraste con la fibra soluble. Con base en lo anterior, todo parece indicar que el contenido de fibra soluble se incrementa al reducirse el contenido de fibra insoluble.

Por otro lado, algunos autores señalan que el contenido de mucílago se incrementa en condiciones de sequía, pues se ha observado que la generación de mucílago en cladodios es menor en periodos de lluvia (Sáenz *et al.*, 2004). Este cambio en la producción del mucílago podría ser un mecanismo adaptativo de la planta que evita la pérdida de agua (Medina *et al.*, 2003). El contenido de mucílago careció de correlación significativa con el porcentaje de materia de seca de los nopalitos obtenido por Ramírez *et al.* (2007), posiblemente porque el incremento en la producción de mucílago se relaciona con condiciones de sequía (Sáenz *et al.*, 2004) y en este trabajo no existió estrés hídrico.

Es probable que el contenido de mucílago de los nopalitos influya en su aceptación por el consumidor, pero se carece de datos acerca del contenido óptimo de mucílago; sin embargo, con base en los datos obtenidos, *O. ficus-indica* puede ser la especie idónea para los consumidores que tienen preferencia por nopalitos con poco mucílago.

#### 4.5 Color

Estadísticamente, la interacción entre los factores especie y estadio de crecimiento fue altamente significativa ( $p < 0.001$ ) en ángulo de tono (Figura 7), índice de intensidad de color (Figura 8) y luminosidad (Figura 9, Cuadro 3). Tal significación en la interacción señala que el tono, la intensidad y la luminosidad depende de la especie y el grado de desarrollo del nopalito. Así, se puede observar que en los nopalitos de las cuatro especies hubo un incremento del ángulo de tono desde el EC1 hasta el EC3 (Figura 7). Asimismo se observó que *N. cochenillifera* fue la especie con el menor ángulo de tono en sus tres EC; sin embargo, sus nopalitos presentaron el mayor índice de intensidad de color (Figura 8), así como la mayor luminosidad (Figura 9). En cambio, los nopalitos de *O. robusta* spp. *larreyi*, presentaron el mayor ángulo de tono y la menor intensidad a partir del EC2, pero ambos atributos fueron intermedios en sus nopalitos EC1.

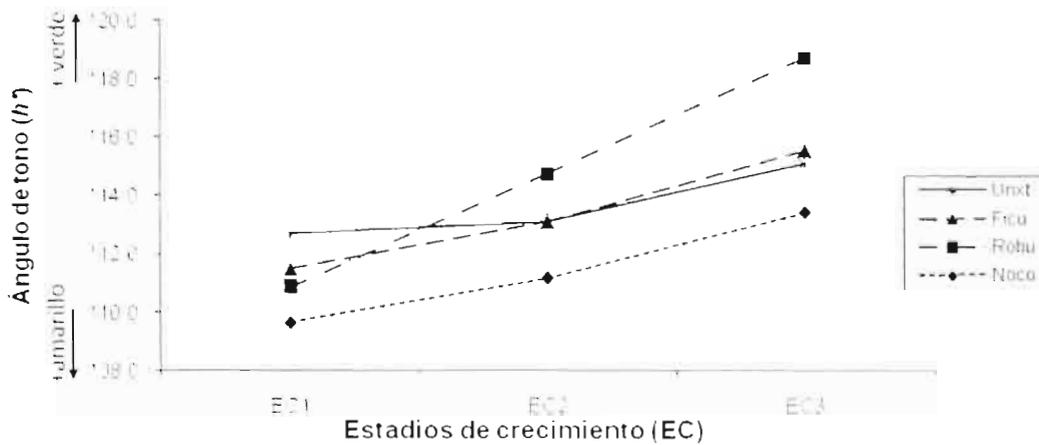


Fig. 7. Angulo de tono ( $90^\circ$  es amarillo y  $180^\circ$  es verde) en nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento (Noco = *N. cochenillifera*, Robu = *O. robusta* spp. *larreyi*, Ficu = *O. ficus-indica*, Unxt = *O. undulata* x *O. tomentosa*)

El cambio del ángulo de tono, de verde al amarillo, observado en los nopalitos desde el EC1 al EC3, está en relación con el incremento de la clorofila (Ladygin *et al.*, 2004; Whatley, 1992; Gibson y Nobel, 1986). Así, el cambio de color en los cladodios, parece correlacionado con el incremento del contenido de plástidos y cloroplastos y con la velocidad fotosintética, lo cual a su vez estaría relacionado con el crecimiento del cladodio hasta al EC3. En efecto, Ramírez (2006) encontró que las especies con mayor productividad fueron *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. robusta* spp. *larreyi*, las cuales, en el presente estudio, fueron las especies con mayor ángulo de tono y pudieron tener mayor contenido de clorofila.

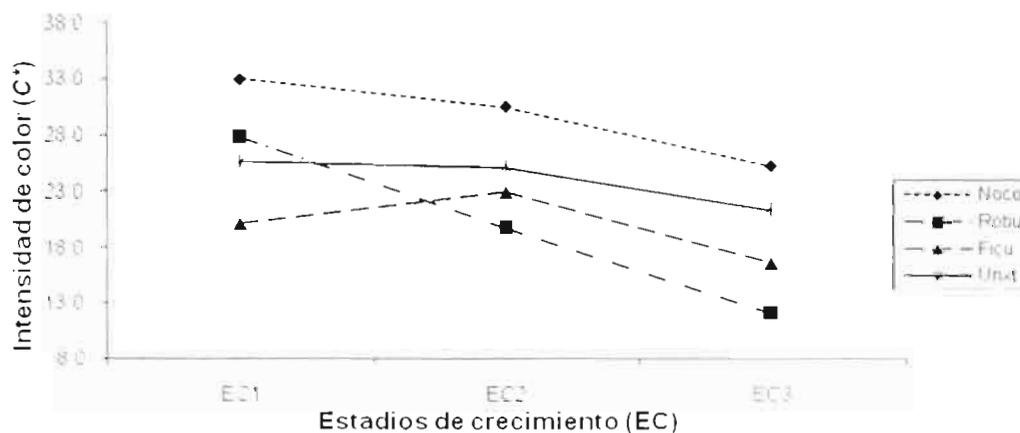


Fig. 8. Intensidad de color ( $C^*$ ) en nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento (Noco = *N. cochenillifera*, Robu = *O. robusta* spp. *larreyi*, Ficu = *O. ficus-indica*, Unxt = *O. undulata* x *O. tomentosa*)

Con respecto al color como un parámetro de calidad en nopalitos, George *et al.* (2004) registraron que el consumidor tiene una preferencia por nopalitos con un ángulo de tono cerca de 114° y con una intensidad y luminosidad cerca de 30 y 43, respectivamente. Sin embargo, en el presente estudio, al menos para las especies evaluadas, resultó difícil que alguna de ellas reunieran a su vez todos los atributos del color considerados como de mayor calidad. Asimismo, es posible que la presencia de cutícula cerosa y de pubescencia hayan influido en la intensidad de color y la luminosidad, lo cual podría explicar que *O. robusta* spp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa* presentaron el ángulo de tono más verde y, a la vez, la menor intensidad de color.

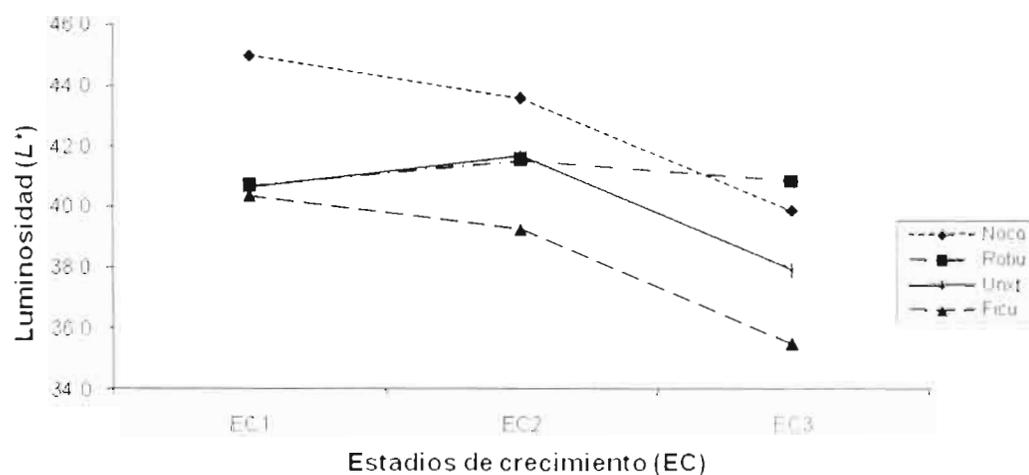


Fig. 9. Luminosidad o brillo ( $L^*$ ) en nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento (Noco = *N. cochenillifera*, Ficu = *O. ficus-indica*, Robu = *O. robusta* spp. *larreyi*, Unxt = *O. undulata* x *O. tomentosa*)

#### 4.6 pH

Sin tomar en cuenta el EC, se presentaron diferencias significativas en pH entre las especies. Los nopalitos de *N. cochenillifera* fueron los menos ácidos, seguidos, sin diferencias estadísticas ( $p < 0.05$ ), por los de *O. robusta* spp. *larreyi* (Cuadro 3). Por su parte, los de *O. ficus-indica* y *O. undulata* x *O. tomentosa* fueron estadísticamente iguales entre sí pero similares ( $p < 0.05$ ) a los de *O. robusta* spp. *larreyi* (Cuadro 3), los más ácidos. Con independencia de la especie, el pH de los nopalitos decreció estadísticamente del EC1 al EC2, pero luego se incrementó del EC2 al EC3.

La interacción especie\*estadio de crecimiento, también altamente significativa (Cuadro 3), indica que la acidez en los nopalitos depende de su estado de desarrollo y de la especie estudiada (Figura 10). Así, se pudo observar que los nopalitos de *O. undulata* x *O. tomentosa* y los de *O. ficus-indica* aumentaron su acidez del EC1 al EC2. Sin embargo, a partir del EC2 se registró un incremento de su pH. En tanto, los nopalitos de *O. robusta* spp. *larreyi* y los de *N. cochenillifera* mantuvieron su acidez sin diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) durante su desarrollo. En estudios realizados sobre el pH de los nopalitos (Rodríguez y Catwell, 1988), se menciona que hay un incremento de la acidez (menor pH) conforme avanza el estadio de crecimiento; sin embargo, en el presente trabajo se observó un patrón diferente (Figura 10).

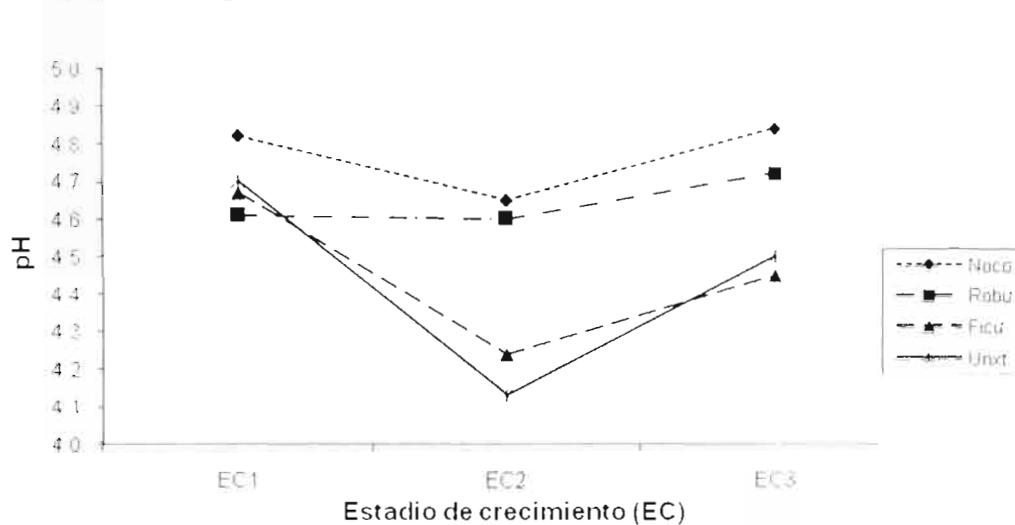


Fig. 10. Acidez (pH) en nopalitos de cuatro especies y tres estadios de crecimiento (Noco = *N. cochenillifera*, Ficu = *O. ficus-indica*, Robu = *O. robusta* spp. *larreyi*, Unxt = *O. undulata* x *O. tomentosa*)

En nopalitos se ha registrado un cambio de ruta metabólica de CAM a  $C_3$  bajo condiciones de riego (Pimienta *et al.*, 2005), lo cual provoca disminución de la acidez (Cushman, 2001). Además, se ha encontrado que el cambio de CAM a  $C_3$  está relacionado con la disposición del agua para la planta (Cushman, 2001). Así, en los EC1 y EC3 posiblemente se presentó metabolismo  $C_3$ , lo que pudo originar el pH mayor en esos estadios, y el decremento del pH en el EC2 en tres de las cuatro especies pudo deberse a algún estrés hídrico no registrado, debido a un incremento en temperatura.

En relación con el cambio de las rutas metabólicas, algunas investigaciones

realizadas en otros vegetales y en nopal bajo condiciones de sequía e invernadero, han señalado que las condiciones hídricas y de acidez en las plantas se relacionan con hormonas, específicamente con las auxinas y el ácido absísico (ABA) (Thompson *et al.* 1997). Los niveles de ABA que fluyen por el xilema, así como su concentración en el apoplasto de las hojas, afectan radicalmente la reacción de los estomas, de tal manera que las condiciones de sequía podrían modificar la concentración de ABA en el apoplasto, provocando una alta sensibilidad de los estomas a la concentración de ABA en el xilema y modificando el pH del apoplasto (Thompson *et al.*, 1997). Además, se ha encontrado que las plantas con buena irrigación presentan un pH menor en sus hojas que aquellas en condiciones de sequía, pues aparentemente se requiere de ciertos niveles de acidez para el desarrollo normal de la planta, ya que es necesario romper los puentes de hidrógeno para permitir el crecimiento de las microfibrillas de celulosa (Thompson *et al.*, 1997). Posiblemente los nopalitos del EC2, al menos los de *O. ficus-indica* y *O. undulata* x *O. tomentosa*, presentaron una reducción en el pH del xilema y de los compartimentos apoplásticos, además de una disminución en la concentración de ABA en los fluidos del xilema (Hartung y Radin, 1989, citados por Thompson *et al.*, 1997; Nieddu *et al.*, 1997), ya que según los resultados obtenidos por Ramírez *et al.* (2007), el EC1 presentó el mayor contenido de materia seca, la cual decreció significativamente en el EC2; es decir, que en este estadio de crecimiento se tuvo el mayor contenido de agua en el nopalito.

La acidez en los nopalitos afecta el sabor, y por tanto la preferencia y aceptación del consumidor (Corrales *et al.*, 2004; Rodríguez y Cantwell, 1988). Los valores registrados de pH fueron similares a los obtenidos por George *et al.* (2004) y Ochoa *et al.* (2004), aunque menores que los obtenidos por Rodríguez y Cantwell (1988) y Flores *et al.* (2004). Sin embargo, los valores obtenidos en las cuatro especies y en su tres estadios de crecimiento se podrían considerar como "aceptables", debido a que en general se tiene preferencia por un nopalito ligeramente ácido (Corrales *et al.*, 2004).

## CONCLUSIONES

La resistencia de los nopalitos a la compresión longitudinal fue menor que la presentada a la compresión lateral. La mayor resistencia a la compresión longitudinal la presentaron los nopalitos de *O. robusta* spp. *larreyi* y la menor los de *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. ficus-indica*. Los nopalitos de *O. ficus-indica* y *O. robusta* spp. *larreyi* opusieron mayor resistencia a la compresión lateral. La resistencia a la compresión varió entre estadios de crecimiento, pero fue diferente entre especies.

Los nopalitos de *N. cochenillifera* y *O. ficus-indica* fueron los más resistentes a ser penetrados y los de *O. robusta* spp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa* los menos resistentes. El EC2 registró la menor resistencia a la penetración y el EC3 la mayor resistencia. La resistencia a la penetración y la riqueza de fibra detergente ácido están positivamente correlacionadas.

Con independencia del estadio de crecimiento, los nopalitos de *N. cochenillifera* presentaron la mayor riqueza de mucílago, y los de *O. ficus-indica* fueron los más pobres en mucílago. El contenido de mucílago fue similar durante el desarrollo de los nopalitos.

Con respecto al color, el ángulo de tono varió entre especies y aumentó con el crecimiento de los nopalitos, pero tal incremento fue distinto entre especies.

El índice de intensidad de color fue distinto entre especies y disminuyó al incrementarse su desarrollo pero de manera diferente en cada especie.

En luminosidad hubo diferencias significativas entre especies, pero los nopalitos más tiernos presentaron mayor luminosidad, aunque la tendencia de la luminosidad con el desarrollo fue diferente entre especies.

Los nopalitos de *N. cochenillifera* presentaron el menor ángulo de tono, el mayor índice de intensidad de color y la mayor luminosidad. El mayor ángulo de tono lo presentaron los nopalitos de *O. robusta* spp. *larreyi*, aunque con el más bajo índice de intensidad de color y luminosidad intermedia.

Los nopalitos de *N. cochenillifera* fueron los menos ácidos y los de *O. undulata* x *O. tomentosa* los más ácidos. El pH de los nopalitos varió al incrementarse su desarrollo, pero de manera diferente en cada especie.

Con respecto a los atributos evaluados, los nopalitos con valores más cercanos a los considerados "aceptables" fueron los de *N. cochenillifera* y *O. robusta* spp *larreyi*

Aunque cada una de las especies estudiadas es considerada como la de mayor calidad en su localidad de origen, ninguna de ellas fue la mejor en todos los atributos evaluados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anzures, S. G.; Corrales G., J. y Peña V., C. 2004. Efecto del almacenamiento en algunos atributos de calidad del nopalito desespinado (*Opuntia* sp.) en la variante Atlixco. En: Flores, V. C. (Ed.). Memoria del X Congreso Nacional y VII Internacional, sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal y del Fifth International Congress on Cactus Pear and Cochineal. Universidad Autónoma Chapingo, Food and Agriculture Organization e International Society for Horticultural Science, Chapingo, México. Edición en CD.
- Bravo H., H. 1978. Las cactáceas de México. Volumen I. Universidad Nacional Autónoma de México, México. D. F. 365 p.
- Cantwell, M. 1991. Quality and postharvest physiology of nopalitos and tunas. In: Felker, P. (Ed) Proceedings Second Annual Texas Prickly Pear Council. McAllen, TX USA pp. 50 – 66.
- Cantwell, M. 1992. Aspectos de calidad y manejo postcosecha de nopalitos. En Salazar, S y López, D. (Eds.). Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. 5º Congreso Nacional y 3º Internacional. Memoria de Resúmenes. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. p. 110.
- Cantwell, M. 1995. Post-harvest management of fruits and vegetable stems. In: Barbera, G.; Inglese, P. y Pimienta B., E. (Eds.). Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear. FAO Plant Production and Protection Paper 132. Food and Agriculture Organization Rome, Italy, pp. 120-136.
- Cantwell, M.; Rodríguez F., A. y Robles C., F. 1992. Postharvest physiology of prickly pear cactus items. Scientia Horticultuae, 50: 1-9.
- Collins, M. y Fritz, J. O. 2003. Forage quality. In: Barnes, R. F.; Nelson, C. J.; Collins, M. y Moore, K. J. (Eds.) Forages. An introduction to grassland agriculture 6<sup>th</sup> edition Iowa State Press, Ames, Iowa, USA. pp 363-390.
- Corrales, G. J.; Peña V., C. B.; Razo M., Y. y Sánchez H., M. 2004. Acidity changes and pH-buffering capacity of nopalitos (*Opuntia* spp.). Postharvest Biology and Technology, 32: 169-174.

- Cushman, J. C. 2001. Crassulacean acid metabolism. A plastic photosynthetic adaptation to arid environments. *Plant Physiology*, 127: 1439-1448.
- Felker, P. y Moss, R. 1994. Carbohydrate metabolism in cacti: gums and mucilage. *Proceedings Fifth Annual Texas Prickly Pear Council*. McAllen, TX., USA. pp 7-12.
- Figueroa H., F. 1984. Estudio de las nopaleras cultivadas y silvestres sujetas a recolección para el mercado en el Altiplano Potosino-Zacatecano. Tesis profesional. Escuela de Agronomía. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P. México. 171p.
- Flores F., J. L y Yeaton, R. I. 2003. The replacement of arborecent cactus species along a climatic gradient in the southern Chihuahuan Desert: competitive hierarchies and response to freezing temperatures. *Journal of Arid Envoriments*, 55: 583-594.
- Flores, H. A.; Orona C., I.; Murillo, A. B.; Valdez, C. R. D. y García, H. J. L. 2004. Producción y calidad de nopalito en la región de la comarca lagunera de México y su relación con el precio en el mercado nacional. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 6: 23-24.
- García R., M. T. 2007. Procesos fisiológicos y contenido de polisacáridos estructurales en nopalito (*Opuntia* spp.) y su modificación por el potencial de agua del suelo. Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad Fisiología Vegetal. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. México. 124 p.
- García H., E. y Peña V., C. 1995. La pared celular. Componente fundamental de las células vegetales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México. México. 96 p.
- George R. S.; Corrales G., J.; Peña V., C. y Rubio H., D. 2004. Cambios en color, sabor y contenido de mucilago en nopalito (*Opuntia ficus-indica*) escaldado con tequezquite. En: Flores, V. C. (Ed.). Memoria del X Congreso Nacional y VII Internacional, sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal y del Fifth International Congress on Cactus Pear and Cochineal. Universidad Autónoma Chapingo, Food and Agriculture Organization e International Society for Horticultural Science. Chapingo, México. Edición en CD.

- Gibson, A. C. 1997. Wood anatomy of *Opuntia* with cylindrical to globular stems. *Botanical Gazette*, 138 (3): 334-351.
- Gibson, A. C. y Nobel, P. S. 1986. *The cactus primer*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, USA. 286 p.
- Goldstein, G.; Andrade, J. L. y Nobel, P. 1991. Differences in water relations parameters from the chlorenchyma and the parenchyma of the *Opuntia ficus-indica* under wet versus dry conditions. *Australian Journal of Plant Physiology*, 18: 95-107.
- Guevara, J. C.; Yahia, E. M.; Brito F., E. y Biserka, S. P. 2003. Effects of elevated concentrations of CO<sub>2</sub> in modified atmosphere packaging on the quality of prickly pear cactus stems (*Opuntia* spp.). *Postharvest Biology and Technology*, 29: 167-176.
- Ladygin, V. G.; Kosobryukhov, A. A. y Vaishya, O. B. 2004. Pigments and gas exchange characteristics in leaves of chlorophyll mutants of *Pisum sativum*. *Russian Journal of Plant Physiology*, 51 (5): 597-603.
- MacDougall, D. B. 2002. Colour measurement of food. In: MacDougall, D. B. (Ed.) *Improving quality*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England pp 33-63.
- Medina T., L.; Brito De La F., E.; Torrestiana S., B. y Alonso, S. 2003. Mechanical properties of gels formed by mixture of mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*) and carrageenans. *Carbohydrate Polymers*, 52: 143-150.
- Nerd, A.; Dumotier, M. y Mizrahi, Y. 1997. Properties and postharvest behavior of the vegetable cactus *Nopalea cochenillifera*. *Postharvest Biology and Technology*, 10: 135-143.
- Nieddu, G.; Chessa, I.; Deidda, P. y Tekle, Z. 1997. Changes in CAM activity ABA, and PA<sub>s</sub> in *Opuntia ficus-indica* as response to drought. *Acta Horticulturae*, 438: 97-103.
- Nobel, P. S., Cavellier, J. y Andrade, J. L. 1992. Mucilage in cacti: its apoplastic capacitance, associated solutes, and influence on tissue water relations. *Journal of Arid Environments*, 43(250): 641-648.
- Ochoa, M. J.; Leguizamo, G.; Ayrault, G. y Miranda, F. N. 2004. Cold storage and shelf life *Nopalea cochenillifera* behavior: evaluation of quality parameters. *Memoria del X*

- Congreso Nacional y VII Internacional, sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal y del Fifth International Congress on Cactus Pear and Cochineal. Universidad Autónoma Chapingo. Food and Agriculture Organization e International Society for Horticultural Science. México. Edición en CD.
- Osmond, C. B. 1978. Crassulacean acid metabolism: a curiosity in context. *Annual Review Plant Physiology*, 29: 379-414.
- Paíz, R. C. 2007. Efecto hipoglucemiante de *Opuntia joconostle* Web, en ratas diabéticas. Tesis de maestría. Programa Multidisciplinario en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S. L. P. 51p.
- Peña V., C. y Sánchez U., A. 2004. Polisacáridos de nopalito y tuna (*Opuntia* spp.) En: Flores, V. C. (Ed.). Memoria del X Congreso Nacional y VII Internacional, sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal y del Fifth International Congress on Cactus Pear and Cochineal. Universidad Autónoma Chapingo, Food and Agriculture Organization e International Society for Horticultural Science. Chapingo, México. Edición en CD.
- Pimienta, E. 1990. El nopal tunero. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco. México. 246 p.
- Pimienta B., E.; Zañudo H., J.; Rosas E., V. C.; Valenzuela T., A y Nobel, P. S. 2005. Young daughter cladodes affect CO<sub>2</sub> uptake by mother cladodes of *Opuntia ficus-indica*. *Annals of Botany*, 95: 363-369.
- Pinos R., J. M.; Duque B., R.; Reyes A., J. A.; Aguirre R., J. R.; García I., J. C. y González M., S. 2006. Effect of species and age on nutrient content and *in vitro* digestibility of *Opuntia* spp. *Journal Applications Animal Research*, 30: 13-16.
- Ramírez T., H. M. 2006. Productividad primaria y calidad nutrimental de nopal (*Opuntia* spp. y *Nopalea* sp.) en condiciones intensivas. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S. L. P México. 70 p.
- Ramírez, A. J. P. y Pimienta B., E. 1995. Efecto del grado de aridez en la anatomía de cladodios de morgofoespecies de nopal (*Opuntia* spp.). In: Pimienta B., E.; C. Neri L.; A. Muñoz U.; F. M. Huerta M. (Eds.). Memorias del VI Congreso Nacional y IV

Internacional sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Guadalajara, Jal. pp. 90-95.

- Ramírez T., H. M.; Reyes A., J. A.; Pinos R., J. M. y Aguirre R., J. R. 2007. Efecto de la especie y madurez sobre el contenido de nutrientes de cladodios de nopal. *Agrociencia*. 41(6): 619-626.
- Rodríguez F., A y Cantwell, M. 1988. Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (nopalitos). *Plant Foods for Human Nutrition*. 38. 83-93.
- Rodríguez F., A. y Villegas O., M. A. 1997. Quality of cactus stems (*Opuntia ficus-indica*) during low temperature storage. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 2: 142-151.
- Sáenz H., C. 2000. Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits and cladodes. *Journal of Arid Environments*. 46: 209-225.
- Sáenz H., C. 1997. Cladodes: a source of dietary fiber. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 2: 117-123.
- Sáenz H., C.; Sepulveda, E. y Matsuhiro, B. 2004. *Opuntia* spp. mucilage's: a functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environments*. 57: 275-290.
- Samish, Y. B. y Ellern, S. J. 1975. Titrable acids in *Opuntia ficus-indica*. *Journal of Range Management*. 28: 365-369.
- Sánchez, P. I.; Cano, M. y Hermida, B., 1994. Blanding, freezing and frozen storage influence texture of white asparagus. *Journal of Food Science*. 59: 821-823
- Schmalko, M.E.; Scipioni, P.G. y Ferreyra, D.J. 2005. Effect of water activity and temperature in color and chlorophylls changes in yerba mate leaves. *International Journal of Food Properties*. 8: 313-322.
- Sharma, S. C. y Wolfe, R. R. 1975. Evaluation of methods for measuring asparagus texture. *Journal of Food Science*. 40: 1021-1024.
- Stingzing, F. C.; Herbach, K. M.; Mosshammer, M. R.; Carle, R.; Yi, W.; Sellappan, S.; Akoh, C. C.; Bunch, R. y Felker, P. 2005. Color, betalain pattern and antioxidant

- properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 53: 442-451.
- Thompson, D. S.; Wilkinson, S.; Bacon, M. A. y Davies, W. J. 1997. Multiple signals and mechanisms that regulate leaf growth and stomatal behavior during water deficit. *Physiologia Plantarum*. 100 303-313.
- Trachtenberg, S. y Fahn, A. 1981. The mucilage of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.-development, ultrastructure, and mucilage secretion. *Botanical Gazette* 142 (2): 206-213.
- Trachtenberg, S. y Mayer, A. M. 1981. Composition and properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochemistry*. 12: 2665-2668.
- Waldron, K.W.; Parker, M. L. y Smith, A. C. 2003. Plant cell walls and food quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2: 128-146.
- Wessels, A. B. y Swart, E. 1990. Morphogenesis of the reproductive bud and fruit of the prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. cv. Morado). *Acta Horticulturae*. 275 245-253.
- Whatley, J. M. 1992. Plastid development in distinctively coloured juvenile leaves. *New Phytology*. 120: 417-426.