

COMPUESTOS ANTIOXIDANTES EN VARIEDADES PIGMENTADAS DE TUNA (*Opuntia sp.*)ANTIOXIDANT COMPOUNDS IN PRICKLY PEAR (*Opuntia sp.*) PIGMENTED VARIETIES

Marcos Ramírez-Ramos¹, Ma. del Rosario García-Mateos^{1, 2*}, Joel Corrales-García³,
Carmen Ybarra-Moncada³ y Ana Ma. Castillo-González¹

¹Instituto de Horticultura, ²Departamento de Preparatoria Agrícola, ³Instituto de Alimentos, Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 carr. México-Texcoco, 56230, Chapingo, Estado de México, México.

*Autor para correspondencia (rosgar08@hotmail.com)

RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar la variación del contenido de betacianinas, betaxantinas, compuestos fenólicos, flavonoides y vitamina C en once variedades pigmentadas de tuna (*Opuntia sp.*) en inmadurez hortícola (10 d antes de madurez hortícola; IH), madurez hortícola (MH) y en postcosecha (10 d después de la madurez hortícola; PC). Los niveles de betacianinas (0.21 a 59.18 mg 100 g⁻¹ pf) encontrados fueron superiores a los de betaxantinas (0.12 a 24.07 mg 100 g⁻¹ pf) en las variedades de tuna púrpuras y rojas en los tres momentos (IH, MH y PC), no se encontró información de la variación del contenido de estos pigmentos durante el desarrollo y en postcosecha del fruto. Durante el almacenamiento postcosecha (PC) aumentaron los contenidos de betacianinas (de 0.46 a 49.15 mg 100 g⁻¹ pf), betaxantinas (de 0.57 a 19.91 mg 100 g⁻¹ pf), compuestos fenólicos (de 106.60 a 165.56 mg EAG 100 g⁻¹ pf) y flavonoides (de 1.34 a 11.21 mg EQ 100 g⁻¹ pf) en la mayoría de variedades pigmentadas. Los niveles superiores de vitamina C se encontraron en la mayoría de las variedades en inmadurez hortícola, que luego disminuyeron gradualmente al llegar a MH y PC. El almacenamiento postcosecha de los frutos de algunas variedades contribuyó a la pérdida de vitamina C.

Palabras clave: *Opuntia sp.*, fenoles, ácido ascórbico, betalainas, flavonoides.

SUMMARY

This study evaluated variation in content of betacyanins, betaxanthins, phenolic compounds, flavonoids, and vitamin C in the fruit of eleven prickly pear pigmented varieties. Samples were harvested at 10 d before horticultural maturity (horticultural immaturity; HI), at horticultural maturity (HM), and at 10 d after harvesting at horticultural maturity (postharvest behavior; PHM). The observed levels of betacyanins (0.21 to 59.18 mg 100 g⁻¹ fw) were far superior than those of betaxanthins (0.12 to 24.07 mg 100 g⁻¹ fw) in varieties of purple and red fruits in the three maturity indexes (HI, HM, and PHM). Preharvest and postharvest variations in these pigments contents were found and depend on genotype. Betacyanins (0.46 to 49.15 mg 100 g⁻¹ fw), betaxanthins (0.57 to 19.91 mg 100 g⁻¹ fw), phenolic compounds (106.60 to 165.56 mg GAE 100 g⁻¹ fw), and flavonoids (1.34 to 11.21 mg QE 100 g⁻¹ fw) increased during storage (PHM) in most of the pigmented varieties, particularly in those with red and purple pulp. Higher levels of vitamin C were found in most of the varieties at HI, which gradually diminished until HM and PHM. In some varieties the storage of the fruits contributes to loss of vitamin C.

Index words: *Opuntia sp.*, phenols, ascorbic acid, betalains, flavonoids.

INTRODUCCIÓN

La comercialización e industrialización de frutos de alto valor funcional puede generar ventajas competitivas y oportunidades económicas para el productor. En México se desconoce la calidad nutracéutica de la enorme riqueza productiva y biodiversidad de productos hortícolas. Como ejemplo de esto puede citarse la amplia diversidad genética del género *Opuntia* (Sumaya-Martínez *et al.*, 2010), del que México es el principal productor del mundo (Sumaya-Martínez *et al.*, 2010; Gallegos y Mondragón, 2011) con una alta variedad de tunas pigmentadas (amarillas, anaranjadas y rojo-púrpura) (Castellanos-Santiago y Yahia, 2008); su producción tiene un importante impacto social y cultural, aunque su competitividad es baja comparada con otros frutos y hortalizas (Corrales y Flores, 2003). Una estrategia para incrementar la baja competitividad de la tuna mexicana en los mercados nacional e internacional, es la identificación y difusión de sus ventajas adicionales, con respecto a las tunas producidas en Europa y África (Zegbe y Mena-Covarrubias, 2010), tales como el potencial nutracéutico y antioxidante de su consumo en fresco (Figuerola *et al.*, 2010; Sumaya-Martínez *et al.*, 2011).

El consumo de tuna aporta lípidos, proteínas, minerales, fibra, aminoácidos, vitamina C, compuestos fenólicos y pigmentos betaláinicos (Figuerola *et al.*, 2010; Sumaya-Martínez *et al.*, 2011), así como altas concentraciones de agentes antioxidantes que le confieren al fruto características de un alimento funcional (Galati *et al.*, 2003). Los pigmentos, principalmente betalainas, se encuentran en la pulpa y en la cáscara del fruto en algunas especies y variedades de *Opuntia*, en su mayoría como betacianinas (responsables del color rojo-púrpura) y betaxantinas (responsables del color amarillo-anaranjado) (Zrýd y Christinet, 2004). Estos pigmentos muestran una importante actividad antioxidante (Figuerola *et al.*, 2010; Sumaya-Martínez *et al.*, 2011) y un uso potencial como pigmentos naturales (Sumaya-Martínez *et al.*, 2011).

Actualmente, existe la tendencia de consumo de alimentos nutraceuticos o funcionales porque se ha reportado que previenen algunas enfermedades degenerativas y contribuyen a mantener la buena salud de sus consumidores (Wildman y Kelley, 2007), razón por la cual genera interés por investigar el contenido de fitoquímicos con actividad antioxidante en productos hortofrutícolas, así como sus cambios en postcosecha debido a las variaciones fisiológicas y bioquímicas propias de los procesos de maduración y senescencia (de Ancos *et al.*, 2009).

El objetivo del estudio fue evaluar la variación del contenido de betacianinas, betaxantinas, compuestos fenólicos, flavonoides y vitamina C en once variedades pigmentadas de tuna (no reportadas anteriormente) cosechadas en tres índices de maduración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Frutos de once variedades de tuna (Cuadro 1) se recolectaron en el huerto experimental de nopal “Dr. Facundo Barrientos Pérez” de la Universidad Autónoma Chapingo entre julio y octubre de 2012, ubicado en Chapingo, Estado de México, en el Altiplano Central Mexicano a 19° 29’ N y 98° 53’ O, a 2240 m de altura. El clima es C(Wo) (w)b (i’)g, templado moderado lluvioso, el más seco de los subhúmedos, con lluvias en verano, temperatura media anual de 17.8 °C y 644 mm de precipitación anual.

La cosecha en cada variedad fue en tres etapas fenológicas: inmadurez hortícola (10 d antes de madurez hortícola; IH), madurez hortícola (MH) y durante el almacenamiento postcosecha (10 d a temperatura ambiente 20 °C y hume-

dad relativa de 60 a 70 %, para hacer las evaluaciones postcosecha (PC). Los frutos en MH se desespinaron, luego se separó la pulpa de la semilla y de la cáscara de cada fruto, la pulpa se fraccionó en fragmentos pequeños que se congelaron por inmersión en nitrógeno líquido y se almacenaron a -20 °C para el análisis posterior de fitoquímicos. Los frutos recolectados en IH y PC tuvieron el mismo tratamiento que los de MH.

Cuantificación de betacianias y betaxantinas

Se determinó el contenido de betacianias y betaxantinas con el método propuesto por Stintzing *et al.* (2003). Se pesó 1 g de muestra congelada, se le adicionaron 10 mL de agua destilada, la muestra se sonicó por 20 min y se centrifugó a 2200 g por 20 min a temperatura ambiente. Se leyó la absorbancia de los extractos en un espectrofotómetro Genesys 10s® (Thermo Scientific, Florida, USA) a las longitudes de onda de 483 nm (betaxantinas) y 538 nm (betacianinas). Para cuantificar la cantidad de betaxantinas y betacianinas (Sumaya-Martínez *et al.*, 2011) se utilizó la fórmula: *Betacianias o betaxantinas (mg g⁻¹) = (A x FD x PM x V) / (ε x l)*⁻¹; donde, *FD* = factor de dilución; *PM* = peso molecular (betacianina: 550 g mol⁻¹, betaxantina: 308 g mol⁻¹; *V* = volumen del extracto (mL); *ε* = coeficiente de extinción molar (betacianina: 60 000 L mol⁻¹cm⁻¹; betaxantina: 48,000 L mol⁻¹cm⁻¹; *P* = peso del tejido; *l* = longitud de la celda (1 cm).

Preparación del extracto para fenoles totales y flavonoides

Se pesó 1 g de muestra, se disolvió mediante sonicación (Cole Parmer 8892®, Illinois, USA) en 25 mL de etanol 95 % v/v durante 15 min. Después de 24 h se ajustó el volumen a 25 mL con etanol 80 % v/v, la mezcla se centrifugó a

Cuadro 1. Descripción de once variedades de tuna (*Opuntia sp.*) cultivadas en la nopalera experimental Dr. Facundo Barrientos Pérez de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

Especie	Variedad	Origen	Color
<i>Opuntia sp.</i>	Alteña Blanca	Celaya, Gto.	Verde
<i>O. megacantha</i> Salm	Plátano	Ojuelos, Jal.	Amarillo
<i>O. ficus-indica</i> (L.). Mill	Huatusco	Huatusco, Ver.	Anaranjado
<i>Opuntia sp.</i>	Alteña Roja	Celaya, Gto.	Rojo
<i>O. ficus-indica</i> (L.). Mill	Solferino	Chapingo, Méx.	Rojo
<i>O. ficus-indica</i> (L.). Mill	Roja Villanueva	Villanueva, Pue.	Rojo
<i>O. megacantha</i> Salm	Morada	San Martín de las Pirámides, Méx.	Púrpura
<i>O. ficus-indica</i> (L.). Mill	Jade	Desconocido	Púrpura
<i>O. ficus-indica</i> (L.). Mill	Copena CEII	Chapingo, Méx. Zacatecas, Zac.	Púrpura
<i>O. ficus-indica</i> (L.). Mill	Copena V1	Chapingo, Méx.	Púrpura
<i>O. robusta</i> var. <i>Larreyi</i>	Tzaponopal rojo	San Martín de las Pirámides, Méx.	Púrpura

1409 g (Chang *et al.*, 2002). Posteriormente, al extracto se le aplicó nitrógeno gaseoso por 3 min (atmósfera inerte) para evitar la oxidación de los metabolitos, y después se mantuvo en refrigeración.

Contenido de fenoles totales

El contenido de fenoles totales se cuantificó con el método propuesto por Waterman y Mole (1994). A 0.5 mL del extracto etanólico se le adicionaron 10 mL de una solución de Na_2CO_3 a 10 % y se incubó a 38 °C por 15 min. Se tomó 1 mL de esta mezcla, a la que se le adicionaron 3 mL de agua y 1 mL del reactivo de Folín-Ciocalteu:agua 1:1 v/v. La mezcla se dejó reposar por 15 min en oscuridad. Finalmente, se tomó lectura de la absorbancia a 660 nm en un espectrofotómetro Genesys 10s® (Thermo Scientific, Florida, USA). El contenido total de fenoles en el extracto se expresó en mg equivalentes de ácido gálico en 100 g de peso fresco (mg EAG 100 g⁻¹ pf).

Cuantificación de flavonoides

El contenido de estos metabolitos se cuantificó con el método propuesto por Chang *et al.* (2002). A 0.5 mL del sobrenadante del extracto etanólico preparado anteriormente, se le agregaron 1.5 mL de etanol a 95 % v/v, 0.1 mL de solución de AlCl_3 a 10 % p/v, 0.1 mL de solución 1 M de acetato de potasio y 2.8 mL de agua destilada. La mezcla se incubó por 30 min. Se tomó la lectura de la absorbancia en el espectrofotómetro Genesys 10s® mencionado anteriormente, a una longitud de onda de 415 nm. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de quercetina en 100 g de peso fresco (mg EQ 100 g⁻¹ pf).

Cuantificación de vitamina C

La determinación de vitamina C se realizó con el método modificado de Durust *et al.* (1997). Se pesó 1 g de muestra a la que se le adicionaron 3 mL de solución de ácido metafosfórico a 3 % v/v, la mezcla se maceró por 3 min y se filtró. Se tomó 1 mL del filtrado, se aforó a 10 mL con la solución de ácido metafosfórico a 3 % v/v. A 2 mL de la mezcla se le adicionaron 2 mL del sistema amortiguador para pH = 4 (ácido acético glacial: acetato de sodio a 5 % p/v, 1:1), 3 mL del dicloroindofenol y 15 mL de xileno, se agitó vigorosamente en un vortex (Thermolyne Type 6700®, USA). Se leyó la absorbancia en el espectrofotómetro Génesis 10s® a 520 nm. A partir de una curva estándar se obtuvo la concentración de ácido ascórbico presente en cada muestra mediante la ecuación: $\text{mg ácido ascórbico total} / \text{mg} = (C \times V \times 100) / (A \times P)$; donde: C = ácido ascórbico en la muestra; V = volumen de aforo; A = mL de alícuota de la solución tomada; P = peso o volumen de la muestra. La concentración de vitamina C se expresó en mg equivalentes de ácido

ascórbico en 100 g de peso fresco (mg EAA 100 g⁻¹ pf).

Análisis estadístico

Se usó un diseño completamente al azar, en el que los tratamientos comprendieron las once variedades analizadas en tres momentos diferentes con cuatro repeticiones por tratamiento; la unidad experimental lo constituyeron los frutos por planta. Los resultados se analizaron mediante un análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$), con el programa SAS® (Statistical Analysis System 9.0).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de betacianinas y betaxantinas

En el presente estudio los valores encontrados de betacianinas fueron superiores a los de betaxantinas en las variedades de tuna púrpuras y rojas en los tres índices de madurez evaluados; sin embargo, en las variedades amarillas (Alteña Blanca, Plátano y Huatusco) el contenido de betaxantinas fue mayor al de betacianinas desde el estado inmaduro hasta el almacenamiento postcosecha. En la mayoría de las variedades también se observó que las concentraciones de ambos tipos de pigmentos se incrementaron durante la maduración del fruto, lo cual coincide con los reportes de Duru y Turker (2005), con excepción de las variedades Solferino, Jade, Copena VI y Copena CEII.

Según Felker *et al.* (2008), la pigmentación de los frutos de *Opuntia* puede ser controlado genéticamente y por influencias regulatorias que podrían ser endógenas (factores de transcripción), exógenas (deficiencia de luz y agua) o la combinación de ambas; los autores señalan que la pulpa es la parte que primero se pigmenta, antes que la piel y que la maduración misma del fruto, proceso regulado mediante factores de transcripción.

En la mayoría de las muestras la concentración de pigmentos se elevó durante el almacenamiento postcosecha, en contraste con lo ocurrido con las betacianinas y las betaxantinas en las variedades Plátano, Huatusco y Larreyi (Cuadro 2). Al respecto, Zegbe y Mena-Covarrubias (2010) indican que el aumento de la concentración de estos pigmentos en la mayoría de las variedades puede ser debido a un efecto de concentración por la pérdida de agua en postcosecha.

En relación al contenido de betacianinas, las variedades de tuna se clasificaron en tres grupos; el primero agrupa a las variedades Alteña Blanca, Plátano y Huatusco con concentraciones menores (0.21 a 2.76 mg 100 g⁻¹ pf) y corresponde a las tunas menos pigmentadas (verdes, amarillas y

anaranjadas); en el segundo se ubican las variedades de color rojo (Alteña Roja, Solferino y Roja Villanueva) con los valores intermedios (6.89 a 8.17 mg 100 g⁻¹ pf); y el tercero comprende las variedades de color púrpura con el intervalo de concentración mayor (10.61 a 59.18 mg 100 g⁻¹ pf). La concentración de betaxantinas muestra similar agrupación, pero con intervalos menores (Cuadro 2).

No se encontraron diferencias significativas de betacianinas entre las variedades de color púrpura: Jade, Copena CEII, Copena VI y Larreyi, en ninguno de los estados de madurez, aunque disminuyó en postcosecha, etapa en la que la variedad Larreyi que presentó la concentración mayor (Cuadro 2). En relación al contenido de betaxantinas (pigmentos responsables del color amarillo) también se encontraron las mismas tendencias en cada uno de los índices de maduración. La concentración mayor se encontró en *O. robusta* var. Larreyi (color púrpura) durante la maduración del fruto, que luego disminuyó en postcosecha, como también revelaron Delgado-Vargas y Paredes-López (2002).

Las diferencias varietales se podrían explicar debido a la expresión propia de cada variedad, como propusieron Figueroa *et al.* (2010) y Sumaya-Martínez *et al.* (2011) en tunas mexicanas. Una situación similar fue reportada en el jugo de frutos amarillos de tuna *O. ficu-indica* cultivados en Marruecos cuyo contenido de algunas betaxantinas (indicaxantina) fue diferente al reportado en los frutos cultivados en Italia y en España (El Gharras *et al.*, 2008). La explicación de estas diferencias aún se desconoce, pero podría deberse a diferencias entre ecotipos, en fisiología, en

estacionalidad, y aún en los procedimientos de extracción.

No se encontró información en la literatura sobre la variación del contenido de estos pigmentos durante la maduración y postcosecha del fruto de *Opuntia*. En MH, la pulpa de *O. robusta* var. Larreyi fue la variedad que presentó los mayores contenidos de betalainas totales (betacianinas y betaxantinas) (59.18 + 24.07 mg 100 g⁻¹ pf, respectivamente) (Cuadro 2), lo cual coincide con lo reportado por Kuti (2004) en *Opuntia* spp. (81.5 mg 100 g⁻¹). Por otro lado, Chávez-Santoscoy *et al.* (2009) reportaron valores ligeramente inferiores de betaxantinas y betacianinas (3.0 a 18.9 y 0.16 a 30.0 mg 100 g⁻¹, respectivamente) en nueve variedades de *Opuntia* spp. distintas a las reportadas en el presente trabajo (Cuadro 2).

Diversos estudios señalan las propiedades antioxidantes de las betalainas y la importancia de frutos de tuna que tienen altas concentraciones de estos compuestos (Stintzing *et al.*, 2001; Piga, 2004; Fernández-López *et al.*, 2010; Sumaya-Martínez *et al.*, 2011). Estos pigmentos son apreciados como ingredientes nutraceuticos por ser promotores de la salud y ayudan en la prevención de enfermedades al disminuir el estrés oxidativo en humanos (Livrea y Tesoriere, 2006).

Además, el contenido de betalainas puede ser un indicador importante para estimar el grado de madurez del fruto de tuna (Sumaya-Martínez *et al.*, 2011), así como para conocer el periodo de máxima concentración de pigmento, el cual coincide con el periodo de madurez hortícola para su

Cuadro 2. Contenido de betacianinas y betaxantinas en la fenología y postcosecha del fruto de once variedades y especies pigmentadas de tuna (*Opuntia* sp.).

Variedad / Especie	Betacianinas (mg 100 g ⁻¹ pf)			Betaxantinas (mg 100 g ⁻¹ pf)		
	IH	MH	PC	IH	MH	PC
<i>Opuntia</i> sp./Alteña Blanca	0.21 c	0.31 d	0.46 d	0.12 d	0.39 d	0.57 e
<i>O. megacantha</i> /Plátano	0.70 c	2.51 d	1.54 d	4.02 cd	8.50 bc	9.95 bc
<i>O. ficus indica</i> /Huatusco	1.94 bc	2.76 d	1.81 d	2.33 cd	5.51 b-d	2.53 de
<i>Opuntia</i> sp./Alteña Roja	7.87 bc	13.15 b-d	14.36 c	6.31 bc	7.69 bc	8.72 c
<i>O. ficus indica</i> /Solferino	7.90 bc	6.89 cd	11.35 cd	4.79 cd	4.26 cd	7.74 c
<i>O. ficus indica</i> /Roja Villanueva	8.17 bc	14.77 b-d	20.62 bc	7.09 bc	12.30 b	14.67 ab
<i>O. megacantha</i> /Morada	10.61 b	11.50 b-d	20.37 bc	3.45 cd	4.53 cd	7.49 cd
<i>O. ficus indica</i> /Jade	31.78 a	25.89 bc	30.13 b	12.95 a	10.59 bc	11.79 bc
<i>O. ficus indica</i> /Copena CEII	25.44 a	23.40 bc	29.04 b	11.12 ab	8.48 bc	11.32 bc
<i>O. ficus indica</i> /Copena V1	30.92 a	29.39 b	30.91 b	11.61 ab	11.25 bc	12.82 bc
<i>O. robusta</i> /Larreyi	30.43 a	59.18 a	49.15 a	13.12 a	24.07 a	19.91 a
CV (5)	27.6	47.9	23.4	31.4	35.6	24.2

IH = inmadurez hortícola; MH = madurez hortícola; PC = almacenamiento postcosecha. CV = coeficiente de variación. Medias con igual letra por columnas son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$).

utilización en la producción de pigmentos naturales (Duru y Turker, 2005).

Contenido de compuestos fenólicos totales

Las concentraciones más altas de compuestos fenólicos se observaron en las variedades verdes, amarillas, anaranjadas y en algunas rojas en la etapa de inmadurez hortícola (IH), y la variedad Alteña Blanca fue la que presentó la mayor concentración (153.1 a 165.5 mg EAG 100 g⁻¹ pf) (Cuadro 3). También se encontraron diferencias significativas entre variedades durante la maduración hasta la MH. Sin embargo, durante el almacenamiento postcosecha no se encontraron diferencias varietales, aunque los fenoles totales aumentaron en algunas variedades.

Dichas variaciones podrían explicarse por las variantes genéticas entre especies y cultivares, así como a las condiciones de cultivo (Scalzo *et al.*, 2005). Stintzing *et al.* (2005) reportaron que los frutos de pulpa de color rojo y púrpura presentan las concentraciones más altas de compuestos fenólicos totales (335 ± 19 y 600 ± 35 mg EAG L⁻¹) en comparación con los frutos de color blanco (242 ± 13 mg EAG L⁻¹), con excepción de dos cultivares de color púrpura en donde el contenido fue menor. Por su parte, Figueroa *et al.* (2010) no observaron una relación del color con el contenido de compuestos fenólicos en 12 cultivares de *Opuntia spp.*, lo cual coincide con los resultados observados en el presente estudio (Cuadro 3). Tampoco Sumaya-Martínez *et al.* (2011) encontraron relación entre el color del fruto de tres grupos de cultivares de tuna (púrpura, amarilla y blanca)

en postcosecha y el contenido de fenoles totales.

Se observó una acumulación de fenoles totales solamente en las variedades de color púrpura durante la maduración del fruto; en contraste, en las variedades de color rojo, verde, amarillo y anaranjado, en el mismo periodo de desarrollo, los niveles disminuyeron. Durante los 10 d de almacenamiento postcosecha a temperatura ambiente (PC), en la mayoría de las variedades aumentó el contenido de estos metabolitos, principalmente en las variedades de color púrpura, posiblemente debido a la pérdida de agua en PC (de Ancos *et al.*, 2009), mientras que en las variedades Plátano y Roja Villanueva hubo una disminución de estos nutraceuticos (Cuadro 3).

La variación del contenido de los compuestos fenólicos en algunos frutos puede deberse a varios factores: a) Aumento de compuestos fenólicos por activación de la enzima fenilalanina-amonioliasa (PAL) como respuesta al estrés por daños mecánicos en los frutos (Pirovani *et al.*, 2009; de Ancos *et al.*, (2009); b) Disminución de estos fitoquímicos durante la maduración del fruto (Fennema, 2000); y c) Prácticas agronómicas, condiciones ambientales y el manejo pre y postcosecha de los frutos (Hagen *et al.*, 2007; Tsao, 2007).

Las concentraciones de compuestos fenólicos aquí observadas en la pulpa de tuna son menores (98.93 a 153.18 y 107.19 a 165.56 mg EAG 100 g⁻¹ pf, en los tratamientos MH y PC, respectivamente) a las descritas por Georgé *et al.* (2005) para frutos de lichies (*Litchi chinensis*), duraznos

Cuadro 3. Contenido de compuestos de fenólicos totales en la fenología y postcosecha del fruto de onces variedades y especies pigmentadas de tuna (*Opuntia sp.*).

Variedad / Especie	Fenoles totales (mg EAG 100 g ⁻¹ pf)		
	IH	MH	PC
<i>Opuntia sp.</i> /Alteña Blanca	156.13 a	153.18 a	165.56 a
<i>O. megacantha</i> /Plátano	121.34 a-c	113.22 b-d	111.90 a
<i>O. ficus indica</i> /Huatusco	118.39 a-c	113.67 b-d	131.96 a
<i>Opuntia sp.</i> /Alteña Roja	120.16 a-c	107.94 b-d	120.75 a
<i>O. ficus indica</i> /Solferino	130.78 ab	112.15 b-d	148.60 a
<i>O. ficus indica</i> /Roja Villanueva	95.99 bc	120.15 b-d	118.39 a
<i>O. ficus indica</i> /Jade	100.70 bc	113.67 b-d	122.52 a
<i>O. megacantha</i> /Morada	80.66 c	98.93 d	107.19 a
<i>O. ficus indica</i> /Copena CEII	100.70 bc	106.59 cd	106.60 a
<i>O. ficus indica</i> /Copena V1	131.95 ab	137.85 ab	143.74 a
<i>O. robusta</i> /Larreyi	107.78 a-c	120.15 a-c	161.43 a
CV (%)	17.6	10.3	19.4

IH = inmadurez hortícola; MH = madurez hortícola; PC = almacenamiento postcosecha; CV = coeficiente de variación. Medias con igual letra por columnas son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$).

(*Prunus persica*) y fresas (*Fragaria spp*) (> 180 mg EAG en 100 g pf), y éstos a su vez son más bajos (> 250 mg EAG en 100 g pf) que en hortalizas como apio (*Apium graveolens*), alcachofa (*Cynara scolymus*) y col de Bruselas (*Brassica oleracea* var. *Gemmifera*).

Es importante mencionar que el consumo de algunas frutas y hortalizas, entre ellos la tuna, proporciona efectos saludables al consumidor debido a la presencia de compuestos fenólicos, los cuales se relacionan con la prevención del daño oxidativo del ADN, de lípidos y de proteínas, así como la inhibición de procesos inflamatorios y la inducción de enzimas detoxificantes (Rodrigo-García *et al.*, 2009).

Scalbert y Williamson (2000) mencionan que los fenoles son los antioxidantes más abundantes en los alimentos, y que su ingesta diaria equivalente a 1 g representa 10 veces más que la aportada por la vitamina C, 100 veces más que la de vitamina E, y 500 veces la de caroteno. Lo anterior permite inferir que los compuestos fenólicos de los alimentos frescos son nutraceuticos que contribuyen de manera importante a la actividad antioxidante.

Contenido de flavonoides

El Cuadro 4 muestra diferencias significativas en el contenido de flavonoides entre variedades en las tres etapas de madurez estudiadas (IH, MH y PC); las variedades Alteña Blanca y Huatusco presentaron los niveles menores en MH. Además, el contenido de estos metabolitos se incrementó durante el desarrollo del fruto y en postcosecha, con excep-

ción de la variedad Solferino. A diferencia de lo observado en los compuestos fenólicos, las concentraciones de flavonoides no se ven afectadas por daños mecánicos directamente vinculados a respuestas de estrés biótico y abiótico (Ruiz y Gómez, 2013), pero durante el tiempo de almacenamiento o la temperatura de refrigeración producen un incremento en su concentración, como también observaron de Ancos *et al.* (2009) en algunos vegetales.

El intervalo de flavonoides aquí registrado fue inferior (1.10 a 11.21 mg EQ 100 g⁻¹ pf) al reportado (9.5 a 37.4 mg EQ 100 g⁻¹) por Chavez-Santoscoy *et al.* (2009) para nueve variedades de *Opuntia spp*. La concentración de flavonoides encontrada en todas las variedades fue menor a la de compuestos fenólicos totales, lo cual podría deberse a que algunos flavonoides se encuentran en forma de procianidinas (taninos condensados), como sucede en otros frutos (Cui *et al.*, 2006). El contenido de procianidinas no se ha estudiado en tuna. Kuti (2004) y Fernández-López *et al.* (2010) identificaron a los flavonoides miricetina y luteolina, quercetina, isoramnetina y kaempferol en tuna, fitoquímicos que también se asocian con la actividad antioxidante.

Contenido de vitamina C

Entre etapas fenológicas, los niveles de ácido ascórbico en la mayoría de las variedades en inmadurez hortícola tendieron a ser decrecientes durante el proceso de maduración del fruto mientras que entre variedades las concentraciones mayores se registraron en las menos pigmentadas. En el jugo del fruto de dos cultivares *O. ficus-indica* y *O. robusta*,

Cuadro 4. Contenido de flavonoides en la fenología y postcosecha de once variedades y especies pigmentadas de tuna (*Opuntia sp.*).

Variedad / Especie	Flavonoides(mg EQ 100 g ⁻¹ pf)		
	IH	MH	PC
<i>Opuntia sp.</i> /Alteña Blanca	1.10 f	1.34 f	1.34 f
<i>O. megacantha</i> /Plátano	6.18 b	6.00 c-e	6.18 b-e
<i>O. ficus indica</i> /Huatusco	1.77 ef	1.85 f	2.59 ef
<i>Opuntia sp.</i> /Alteña Roja	3.76 c-e	4.32 de	4.37 c-f
<i>O. ficus indica</i> /Solferino	5.73 bc	4.08 e	3.23 d-f
<i>O. ficus indica</i> /Roja Villanueva	4.43 b-d	6.88 bc	9.60 ab
<i>O. ficus indica</i> /Jade	4.74 b-d	6.27 b-d	6.69 b-d
<i>O. megacantha</i> /Morada	3.13 d-f	4.59 de	6.00 b-e
<i>O. ficus indica</i> /Copena CEII	6.72 ab	6.90 bc	8.34 ab
<i>O. ficus indica</i> /Copena V1	6.63 ab	9.90 ab	8.23 a-c
<i>O. robusta</i> /Larreyi	8.71 a	10.20 a	11.21 a
CV (%)	19.9	16.1	27.1

IH = inmadurez hortícola; MH = madurez hortícola; PC = almacenamiento postcosecha; CV = coeficiente de variación. Medias con igual letra por columnas son estadísticamente iguales (P ≤ 0.05).

Stintzing *et al.* (2005) reportaron los niveles de 51.1, 70.2 y 67.9 mg L⁻¹ para frutos blancos, anaranjados y rojos, respectivamente, y el mayor contenido (95.4 mg L⁻¹) para frutos de color púrpura. Según El Gharras *et al.* (2008), el ácido ascórbico evita la degradación de betalainas presentes en el jugo de tuna; no obstante la estabilidad de estos pigmentos disminuye durante el almacenamiento (Piga, 2004).

En algunas variedades se encontró disminución del contenido de vitamina C durante el almacenamiento a temperatura ambiente, mientras que en las variedades Alteña Blanca y Alteña Roja eso no ocurrió (Cuadro 5). Lee y Kader (2000) señalaron que la degradación de la vitamina C en los frutos durante la fase de postcosecha es debida al inadecuado almacenamiento, sobre todo en altas temperaturas. En las variedades Roja Villanueva, Morada, Copena CEII y Larreyi no se encontró la presencia de ácido ascórbico en ningún momento (Cuadro 5), posiblemente por las variantes genéticas presentes (Lee y Kader, 2000).

Los contenidos de ácido ascórbico (0.0 a 23.85 mg EAA 100 g⁻¹ pf) encontrados en el presente trabajo son similares a los reportados por Figueroa *et al.* (2010) en 12 variedades de *Opuntia* spp. (5.31 a 25.0 mg EAA 100 g⁻¹ pf) medidas en madurez hortícola. En cambio, Corral-Aguayo *et al.* (2008) reportaron una concentración de 40 mg EAA 100 g⁻¹ en frutos de tuna; Kuti (2004) encontró 45.8 mg EAA 100 g⁻¹ en frutos de *O. ficus-indica*. Ambas referencias reportaron valores superiores a los encontrados en algunas variedades en la presente investigación (28.44 mg EAA 100 g⁻¹ pf) (Cuadro 5).

Al estudiar la influencia de la lesión mecánica de la capacidad antioxidante de diferentes tejidos vegetales, Reyes *et al.* (2007) encontraron una disminución del contenido de esta vitamina posiblemente debida al corte y al almacenamiento durante 2 d a 15 °C.

La actividad antioxidante descrita en frutos de tuna roja se correlaciona con la concentración de compuestos fenólicos y de ácido ascórbico (Sumaya-Martínez *et al.*, 2011). Aunque en menor grado, los flavonoides también contribuyen a la actividad antioxidante de los frutos, en función de sus características estructurales. Dok-Go *et al.* (2003) reportaron la presencia de diferentes flavonoides (éter 3-metilico de quercetina, dihidroquercetina y quercetina) en *O. ficus-indica* var. Saboten, que según Piga (2004) poseen actividad antioxidante. Al respecto, Rice-Evans *et al.* (1996) consideran que los glicósidos de flavonoides presentan menor actividad antioxidante que sus agliconas, debido a que el grupo -OH del carbono-3 de su estructura se encuentra unido a un azúcar.

Según Kuti (2004), la capacidad antioxidante de los frutos de tuna puede deberse a la presencia sinérgica de flavonoides, ácido ascórbico y carotenoides. Según Galati *et al.* (2003), la vitamina C aporta aproximadamente 15 % de la actividad antioxidante total de la tuna, mientras que los compuestos polifenólicos, los flavonoides y las betalainas contribuyen con 85 % restante; estos autores atribuyen la actividad antioxidante de tuna a la presencia de compuestos fenólicos (ácido ferúlico) y flavonoides (glucósido de isoramnetina y rutina).

Cuadro 5. Contenido de compuestos de vitamina C en la fenología y postcosecha del fruto de once variedades y especies pigmentadas de tuna (*Opuntia* sp.).

Variedad / Especie	Ácido ascórbico (mg EAA 100 g ⁻¹ pf)		
	IH	MH	PC
<i>Opuntia</i> sp./Alteña Blanca	9.16 c	3.54 cd	3.74 c-e
<i>O. megacantha</i> /Plátano	28.44 b	23.85 b	15.49 b
<i>O. ficus indica</i> /Huatusco	14.15 c	19.06 b	0.00 e
<i>Opuntia</i> sp./Alteña Roja	37.16 a	34.07 a	37.14 a
<i>O. ficus indica</i> /Solferino	12.91 c	9.82 c	4.62 cd
<i>O. ficus indica</i> /Roja Villanueva	0.00 d	0.00 d	0.00 e
<i>O. ficus indica</i> /Jade	9.05 c	4.74 cd	2.80 de
<i>O. megacantha</i> /Morada	0.00 d	0.00 d	0.00 e
<i>O. ficus indica</i> /Copena CEII	0.00 d	0.00 d	0.00 e
<i>O. ficus indica</i> /Copena V1	15.65 c	22.16 b	8.04 c
<i>O. robusta</i> /Larreyi	0.00 d	0.00 d	0.00 e
CV (%)	25.8	24.2	28.2

IH = inmadurez hortícola; MH = madurez hortícola; PC = almacenamiento postcosecha; CV = coeficiente de variación. Medias con igual letra por columnas son estadísticamente iguales (P ≤ 0.05).

CONCLUSIONES

En los frutos de tuna las concentraciones de betacianinas fueron mayores a las de betaxantinas en las variedades de color púrpura y rojo en las etapas de maduración y postcosecha. Las variedades de color amarillo presentaron el contenido de betaxantinas mayor en las tres etapas fenológicas (inmadurez, madurez y postcosecha). En la mayoría de las variedades, principalmente en las pigmentadas rojas y púrpura se observó un aumento de betalainas, compuestos fenólicos y flavonoides durante la maduración y almacenamiento postcosecha del fruto. Las mayores concentraciones de compuestos fenólicos se encontraron en las variedades verdes, amarillas, anaranjadas y algunas rojas, en la etapa de inmadurez hortícola. En postcosecha algunas variedades presentaron pérdida diferencial de ácido ascórbico.

Los frutos de tuna constituyen una fuente importante de compuestos antioxidantes, principalmente por la presencia de compuestos fenólicos y betalainas. A pesar de que la tuna no es un fruto climatérico, presenta cambios en postcosecha que difiere entre variedades, por lo que se sugiere la necesidad de estudiar los cambios de los nutraceuticos por cada variedad y por cada índice de cosecha.

BIBLIOGRAFÍA

- Castellanos-Santiago E. and E. M. Yahia (2008) Identification and quantification of betalains from the fruits of 10 Mexican prickly pears cultivar by high performance liquid chromatography and electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Agricultural Food and Chemistry* 56:5758-5764.
- Chang C., M. Yang, H. Wen and J. Chern (2002) Estimation of total flavonoids content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis* 10:176-182.
- Chavez-Santoscoy R. A., J. A. Gutierrez-Urbe and S. O. Serna-Saldívar (2009) Phenolic composition, antioxidant capacity and *in vitro* cancer cell cytotoxicity of nine prickly pear (*Opuntia* spp.) juices. *Plant Foods for Human Nutrition* 64:146-152.
- Corral-Aguayo R., E. Yahia, A. Carrillo-López and G. González-Aguilar (2008) Correlation between some nutritional components and the total antioxidant capacity measured with six different assays in eight horticultural crops. *Journal of Agricultural Food and Chemistry* 56:10498-10504.
- Corrales G. J. y V. C. Flores (2003) Nopalitos y Tunas: Producción, Comercialización, Poscosecha e Industrialización. 1ª ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 225 p.
- Cui N., K. Nakamura, S. Tian, H. Kayahara and Y. Tian (2006) Polyphenolic content and physiological activities of chinese hawthorn extracts. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry* 70:2948-2956.
- de Ancos B., S. C. Moreno y P. M. Cano (2009) Aspectos nutricionales y saludables de vegetales frescos cortados: In: Aspectos Nutricionales y Sensoriales de Vegetales Frescos Cortados. Ed. Trillas. México. pp:120-154.
- Delgado-Vargas F. and O. Paredes-López (2002) Natural Colorants for Food and Nutraceutical Uses. CRC Press. Boca Raton, Florida, EUA. 344 p.
- Dok-Go H., K. H. Lee, H. J. Kim, E. H. Lee, J. Lee, Y. S. Song, Y. H. Lee, C. Jin, Y. S. Lee and J. Cho (2003) Neuroprotective effects of antioxidative flavonoids, quercetin, (+)-dihydroquercetin and quercetin 3-methyl ether, isolated from *Opuntia ficus-indica* var. *saboten*. *Brain Research* 965:130-136.
- Duru B. and N. Turker (2005) Changes in physical properties and chemical composition of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) during maturation. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 7:22-33.
- Durust N., D. Sumengen and Y. Durust (1997) Ascorbic acid and element contents of foods of Trabzon (Turkey). *Journal of Agricultural Food and Chemistry* 45:2085-2087.
- El Gharraz H., A. Hasib, A. Jaouad, A. El-bouadili and B. Schoefs (2008) Stability of vacuolar betaxanthin pigments in juices from Moroccan yellow *Opuntia ficus-indica* fruits. *International Journal of Food Science and Technology* 43:351-356.
- Felker P., F. C. Stintzing, E. Müssig, M. Leitenberger, R. Carle, T. Vogt and R. Bunch (2008) Colour inheritance in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruits. *Annals of Applied Biology* 152:307-318.
- Fennema O. R. (2000) Química de los Alimentos. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza, España. 1258 p.
- Fernández-López J. A., L. Almela, J. M. Obón and R. Castellar (2010) Determination of antioxidant constituents in cactus pear fruits. *Plant Foods for Human Nutrition* 65:253-259.
- Figueroa C. I., D. T. Martínez M., E. Rodríguez P., T. Colinas L., S. Valle G., S. Ramírez R. y C. Gallegos V. (2010) Contenido de pigmentos, otros compuestos y capacidad antioxidante en 12 cultivares de tuna (*Opuntia* spp.) de México. *Agrociencia* 44:763-771.
- Galati E. M., M. R. Mondello, D. Giuffrida, G. Dugo, N. Miceli, S. Pergolizzi and M. F. Taviano (2003) Chemical characterization and biological effects of Sicilian *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Fruit juice: antioxidant and antitumor activity. *Journal of Agricultural Food and Chemistry* 51:4903-4908.
- Gallegos V. C. y J. C. Mondragón (2011) Cultivares Selectos de Tuna de México al Mundo. 1ª ed. Universidad Autónoma Chapingo, México. 159 p.
- Georgé S., P. Brat P., P. Alter and M. J. Amiot-Carlín (2005) Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plants derived products. *Journal of Agricultural Food and Chemistry* 53:1370-1373.
- Hagen S. F., G. I. A. Borge, G. B. Bengtsson, W. Bilger, A. Berge, K. Haffner and K. A. Solhag (2007) Phenolics content and other health and sensory related properties apple fruit (*Malus domestica* Borkh., cv. Aroma): Effect of postharvest UV-B irradiation. *Postharvest Biology and Technology* 45:1-10.
- Kuti J. (2004) Antioxidant compounds from four *Opuntia* cactus pear fruit varieties. *Food Chemistry* 85:527-533.
- Lee S. K. and A. A. Kader (2000) Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content in horticultural crops. *Postharvest Biology and Technology* 20:207-220.
- Livrea M. A. and L. Tesoriere (2006) Health benefits and bioactive components of the fruits from *Opuntia ficus-indica* [L.] Mill. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 8:73-90.
- Piga A. (2004) Cactus Pear: a fruit of nutraceutical and functional importance. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 2004:9-22.
- Pirovani M. E., A. M. Piagentini, D. R. Güemes, M. C. Rodríguez, A. G. Qüesta y R. M. Casóliba (2009) Calidad sensorial y nutricional de vegetales de hojas frescos y cortados: In: Aspectos Nutricionales y Sensoriales de Vegetales Frescos Cortados. Editorial Trillas. México. pp:64-97.
- Reyes L. F., J. E. Villareal and L. Cisneros Z. (2007) The increase in antioxidant activity relationship of flavonoids and phenolic acids. *Free Radical Biology and Medicine* 20:933-956.
- Rice-Evans C. A., N. J. Miller and G. Paganga (1996) Structure-antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids. *Free Radical Biology and Medicine* 20:933-956.
- Rodrigo-García J., E. Álvarez-Parrilla, L. A. de la Rosa, G. A. González-Aguilar y S. Ruiz-Cruz (2009) Compuestos bioactivos de frutos templados y sus beneficios en la salud: In: Aspectos Nutricionales y Sensoriales de Vegetales Frescos Cortados. Ed. Trillas. México. pp:195-230.
- Ruiz G. Y. and P. E. Gómez (2013) Elicitors: A tool for improving fruit phenolic content. *Agriculture* 3:33-52.
- Scalbert A. and G. Williamson (2000) Dietary intake and bioavailability of polyphenols. *Journal of Nutrition* 130:2073S-2085S.
- Scalzo J., A. Politi, N. Pellegrini, B. Mezzetti and M. Battino (2005)

- Plant genotype affects total antioxidant capacity and phenolic contents in fruit. *Nutrition* 21:207-213.
- Stintzing F., A. Schieber and R. Carle (2001)** Phytochemical and nutritional significance of cactus pear. *European Food Research and Technology* 212:396-407.
- Stintzing F., A. Schieber and R. Carle (2003)** Evaluation of color properties and chemical quality parameters of cactus juice. *European Food Research and Technology* 216:303-311.
- Stintzing F. C., K. M. Herbach, M. R. Mosshammer, R. Carle, W. Yi, S. Sellappan, C. C. Akoh, R. Bunch and P. Felker (2005)** Color, betalain pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia spp.*) clones. *Journal of Agricultural Food and Chemistry* 53:442-451.
- Sumaya-Martínez M. T., T. Suárez-Diéguez, N. S. Cruz-Cansino, E. Alanís García y J. G. Sampedro (2010)** Innovación de productos de alto valor agregado a partir de la tuna mexicana. *Revista Mexicana de Agronegocios* 27:435-441.
- Sumaya-Martínez M. T., S. Cruz-Jaime, E. Madrigal-Santillán, J. D. García-Paredes, R. Cariño-Cortés, N. Cruz-Cansino, C. Valadez-Vega, L. Martínez-Cárdenas and E. Alanís-García (2011)** Betalain, acid ascorbic, phenolic contents and antioxidant properties of purple, red, yellow and white cactus pears. *International Journal of Molecular Sciences* 12:6452-6468.
- Tsao R. (2007)** Extraction, separation, detection, and antioxidant activity of apple polyphenols: *In: Antioxidant Measurement and Applications*. F. Shahidi and H. Chi-Tang (eds.). American Chemical Society. Washington, D.C. EUA. pp:202-234.
- Waterman P. G. and S. Mole (1994)** Analysis of Phenolic Plant Metabolites. *Methods in Ecology*. Black well Scientific Publications. Oxford, R.U. 238 p.
- Wildman R. E. C. and M. Kelley (2007)** Nutraceuticals and functional foods: *In: Handbook of Nutraceuticals and Functional Foods*. R. E. C. Wildman (ed.). CRC Press. Boca Raton, EUA. pp:1-21.
- Zegbe J. A. and J. Mena-Covarrubias (2010)** Postharvest changes in weight loss and quality of cactus pear fruit undergoing reproductive bud thinning. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 12:1-11.
- Zrýd J. P. and L. Christinet (2004)** Betalains: *In: Plant Pigment and Their Manipulation*. K. Davies (ed.). CRC Press. EUA. pp:185-213.