

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENÉTICA

CALIDAD DE FRUTO Y CARACTERIZACIÓN GENÉTICA DE GENOTIPOS DE PITAHAYA (*Hylocereus* spp.)

ALEJANDRA VILLA MARTÍNEZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS






MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2021

La presente tesis titulada: **Calidad de fruto y caracterización genética de genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*)**, realizada por el (la) alumno (a): **Alejandra Villa Martínez** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENÉTICA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO	 _____
	DR. MANUEL LIVERA MUÑOZ
ASESOR	 _____
	DR. FERNANDO CASTILLO GONZÁLEZ
ASESORA	 _____
	DRA. MA. DE LOURDES ARÉVALO GALARZA
ASESOR	 _____
	DR. ALBERTO ENRIQUE BECERRIL ROMÁN
ASESOR	 _____
	DR. CÉSAR HUMBERTO RIVERA FIGUEROA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, septiembre de 2021

CALIDAD DE FRUTO Y CARACTERIZACIÓN GENÉTICA DE GENOTIPOS DE PITAHAYA (*Hylocereus* spp.)

Alejandra Villa Martínez, D.C.

Colegio de Postgraduados, 2021

RESUMEN

La pitahaya (*Hylocereus* spp.) es un cactus perenne de hábito trepador, sus frutos son considerados exóticos por su atractivo visual y tiene gran potencia económico. En este estudio se analizó la calidad de fruto y la diversidad y huella genética de 31 genotipos de pitahaya mediante 14 microsatélites (SSR). La calidad postcosecha de 11 genotipos se realizó a través de variables morfológicas, bioquímicas y de color de fruto. Los resultados revelaron genotipos con pesos entre 242-469 g; relación de pulpa/cáscara entre 68-87 %; diversas formas de fruto y brácteas por medio de clasificaciones propias; densidad de brácteas de 15-31 por fruto y con pérdida de peso de 5.66-10.86 % (10 días, 22.5 °C, 56 % HR) con alta correlación a la densidad estomática en brácteas. El contenido de sólidos solubles totales osciló entre 12.5-15.9; los porcentajes de ácido málico entre 0.215-0.415; índice SST/AT entre 35.52-61.14. El contenido de Vitamina C, betalainas y fenoles totales revelaron una alta correlación con la capacidad antioxidante con porcentajes desde 6.29 a 52.94 %. El color de cáscara y pulpa se manifestaron en relación con el contenido de betalainas. En el estudio de diversidad y huella genética los 14 SSR mostraron un porcentaje de polimorfismo de 85.71 %; la diversidad genética en el germoplasma mostró medias entre 0.41-0.40 en 4 subgrupos. Resultó alta la diferencia entre las distancias genéticas de las accesiones con una media de 0.45476. La estructura de la población reveló dos acervos genéticos compartidos con coeficientes de pertenencia entre 50-95 %, doce de los 14 SSR mostraron polimorfismo y poder discriminatorio para construir la huella genética del germoplasma estudiado.

Palabras clave: Pitahaya, Diversidad Genética, Microsatélites, Calidad Postcosecha, Potencial Productivo.

**FRUIT QUALITY AND GENETIC CHARACTERIZATION OF PITAYA
GENOTIPES (*Hylocereus spp.*)**

Alejandra Villa Martínez, D.C.

Colegio de Postgraduados, 2021

ABSTRACT

The pitahaya is a perennial cactus and climbing habit, its fruits are considered exotic for the visual appeal that represents the wide range of colors of peel and flesh. The Postgraduate College developed the *Hylocereus* Genetic Resources project: Conservation and Sustainable Use, where outstanding genotypes were derived, with high productive potential and quality fruits. This study determined the genetic diversity and footprint of 31 pitahaya genotypes using 14 microsatellites (SSR). Post-harvest quality of 11 genotypes was also evaluated through morphological, biochemical and fruit color variables. The 14 SSR showed a polymorphism percentage of 85.71 %; genetic diversity in the germplasm showed averages between 0.41-0.40 in 4 subgroups. The difference between the genetic distances of the accessions was high, with an average of 0.45476. The structure of the population revealed two shared genetic collections with belonging coefficients between 50-95 %, twelve of the 14 SSR showed polymorphism and discriminatory power to construct the genetic fingerprint of the studied germplasm. Postharvest quality revealed genotypes with weights between 242-469 g; flesh/peel ratio between 68-87 %; various forms of fruit and bracts through own classifications; bract density of 15-31 per fruit and with weight loss of 5.66-10.86 % (10 days, 22.5 °C, 56% RH) with high correlation to stomatal density in bracts. Total soluble solids content ranged between 12.5-15.9; malic acid percentages between 0.215-0.415; SST/AT index between 35.52-61.14. The content of Vitamin C, betalaines and total phenols revealed a high correlation with antioxidant capacity with percentages ranging from 6.29 to 52.94 %. The peel and pulp colour were manifested in relation to the betalain content.

Keywords: Pitahaya, Genetic diversity, Microsatelites, Postharvest quality, productive potential.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por todas las enseñanzas de vida y por permitirme llegar hasta este momento.

Al Colegio de Postgraduados, por brindarme un espacio para mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme el financiamiento para llevar a cabo el presente trabajo de investigación.

Al Dr. Manuel Livera Muñoz, por la oportunidad que me dio de formar parte de su equipo de trabajo en tan bonito proyecto de investigación.

Al Dr. Fernando Castillo González y el M.C. Roberto Flores, por todo el acompañamiento durante las visitas de campo y el apoyo brindado para el trabajo de laboratorio.

A la Dra. Lourdes Arévalo Galarza, por todo el apoyo que me brindó para llevar a cabo de manera satisfactoria el trabajo en el laboratorio de postcosecha, por sus consejos y su asesoría.

A los doctores Enrique Becerril Román y César Rivera Figueroa, por su apoyo y asesoría durante mi formación académica.

A la Dra. Martha Hernández Rodríguez, por su acertada y amable asesoría en el laboratorio de marcadores moleculares, sus consejos y todas las enseñanzas de tiempo extra.

A Laura Carrillo, por el apoyo incondicional en el laboratorio.

Al Dr. Amalio Santacruz Varela, por todo el apoyo brindado, los consejos y su papel de sinodal durante mi preparación final.

A todo el equipo del laboratorio de Fisiotecnia Vegetal, por el apoyo y espacio brindados durante la investigación.

A todos los catedráticos que abonaron para mi formación académica en esta gran institución que es el Colegio de Postgraduados.

Sinceramente y de todo corazón,

Alejandra Villa Martínez

DEDICATORIA

A mis padres, Juan Manuel y Rosalía, porque siempre han creído en mí, porque me apoyan en cada decisión y por amarme incondicionalmente. Este y cada logro de mi vida es por y para ustedes con todo mi amor.

A mi hermano Juan Manuel, porque siempre ha estado para mí, por ser el mejor cómplice de sangre y apoyarme en mis locuras. Gracias, esto también es para ti, hermano.

A mi hermana Liza Rebeca (DEP), por ser mi fuente de motivación más grande, por esas enseñanzas que me dejó con su partida y por no dejarme sola cuando más la he necesitado. Esto es para ti, hermanita.

A mis tías, por el apoyo y amor incondicional en cada etapa de mi vida, por la motivación que me han dado siempre y sobre todo en la distancia durante mi formación académica.

A mis primas (os), porque siempre han sido como mis hermanas mayores y ese amor ha sido fuente de inspiración toda mi vida.

A mis sobrinas (os), porque me recuerdan que vienen sus pasos detrás de mí y me impulsan a ser un mejor ejemplo para ellas (os).

A mis amigas, porque han sido mi familia elegida gracias a todo el apoyo, el amor, los momentos y los consejos.

A todas las personas no nombradas aquí pero que han contribuido en mi experiencia y crecimiento durante este periodo de formación.

Mil gracias, va con mucho cariño para ustedes porque son parte de este logro

Ale

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
DEDICATORIA	vi
LISTA DE CUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
Literatura citada	10
CAPÍTULO I. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE FRUTO DE PITAHAYA DE GENOTIPOS SELECTOS (<i>Hylocereus spp.</i>).....	14
1.1. RESUMEN	14
1.2. SUMMARY	15
1.3. INTRODUCCIÓN	16
1.4. MATERIALES Y MÉTODOS	19
1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
1.6. CONCLUSIONES	58
1.7. LITERATURA CITADA.....	60
CAPÍTULO II. VARIABILIDAD Y HUELLA GENÉTICA DE GENOTIPOS DE PITAHAYA (<i>Hylocereus spp.</i>) CON MARCADORES SSR.....	66
2.1. RESUMEN	66
2.2. SUMMARY	67
2.3. INTRODUCCIÓN	68
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS	73
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
2.6. CONCLUSIONES	93
2.7. LITERATURA CITADA.....	94
CONCLUSIONES GENERALES	98
ANEXOS	99

LISTA DE CUADROS

Capítulo 1

Cuadro 1. Genotipos de pitahaya (<i>Hylocereus spp.</i>) utilizados en el estudio	20
Cuadro 2. Escala de clasificación para forma de fruto de pitahaya, según el índice ecuatorial y polar (elaboración propia).....	22
Cuadro 3. Escala de clasificación para forma de brácteas de pitahaya, según el índice base y largo (elaboración propia).....	23
Cuadro 4. Variables morfológicas de frutos de pitahaya (<i>Hylocereus spp.</i>)	31
Cuadro 5. Estomas en brácteas y pérdida de peso de 11 genotipos de pitahaya (<i>Hylocereus spp.</i>)	35
Cuadro 6. Valores de correlación de Pearson para variables de pérdida de peso, estomas en brácteas y número de brácteas en fruto de pitahaya (<i>Hylocereus spp.</i>). Nivel de significancia de 0.05 bilateral.	35
Cuadro 7. Variación explicada por los cuatro componentes principales derivados de 11 variables morfológicas de frutos de 11 genotipos de pitahaya (<i>Hylocereus spp.</i>).....	37
Cuadro 8. Variables bioquímicas de frutos de pitahaya (<i>Hylocereus spp.</i>)	46
Cuadro 9. Valores de correlación de Pearson para variables de capacidad antioxidante, fenoles totales, vitamina C y pigmentos. Nivel de significancia de 0.05 bilateral.	47
Cuadro 10. Variación explicada por los dos componentes principales derivados de 8 variables bioquímicas de frutos de 11 genotipos de pitahaya (<i>Hylocereus spp.</i>).....	48
Cuadro 11. Variables de color en escala CIE-LCh de 11 genotipos de pitahaya (<i>Hylocereus spp.</i>)	52
Cuadro 12. Variación explicada por los dos componentes principales derivados de variables de color de cáscara y pulpa de frutos de 11 genotipos de pitahaya (<i>Hylocereus spp.</i>)	53
Cuadro 13. Variación explicada por los tres componentes principales derivados de variables bioquímicas en conjunto con variables de	

color de cáscara y pulpa de frutos de 11 genotipos de pitahaya (<i>Hylocereus spp.</i>)	56
---	----

Capítulo 2

Cuadro 1. Accesiones de <i>Hylocereus spp.</i> utilizadas en el estudio.....	74
Cuadro 2. Lista de 14 microsatélites SSR utilizados en el estudio de 31 accesiones de <i>Hylocereus spp.</i>	77
Cuadro 3. Parámetros genéticos de 14 loci estudiados en accesiones de pitahaya (<i>Hylocereus spp.</i>).....	78
Cuadro 4. Parámetros genéticos de 31 accesiones de pitahaya (<i>Hylocereus spp.</i>)	81
Cuadro 5. Perfiles genéticos de las 31 accesiones de <i>Hylocereus spp.</i> a partir de 14 marcadores moleculares SSR, expresados en pares de bases (pb).....	85

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

- Figura 1. Forma de fruto:** a) frutos alargados (Menor o igual a 0.500); b) frutos redondos (0.686-1); c) frutos ovalados (0.501-0.685). Clasificación propia (Cuadro 2). 32
- Figura 2. Forma de brácteas:** a) brácteas en forma de espada (0.50-0.63); b) brácteas en forma triangular (0.96-1.43); c) brácteas mayoría en forma de espada (0.64-0.80); d) brácteas mayoría en forma triangular (0.81-0.95). Clasificación propia (Cuadro 3). 33
- Figura 3.** Porcentaje de pérdida de peso de 11 genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) después de 10 días de almacenamiento (Temperatura 22.5 °C, HR 56%) (Tukey 0.05). 34
- Figura 4.** Gráfico de dispersión de los genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) en función de los tres primeros componentes principales derivado de variables morfológicas de fruto..... 38
- Figura 5.** Gráfico de dispersión de los genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) en función de dos componentes principales derivado de variables bioquímicas de fruto. 50
- Figura 6.** Gráfico de dispersión de los genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) en función de dos componentes principales derivado de variables de color de cáscara y de pulpa..... 55
- Figura 7.** Gráfico de dispersión de los genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) en función de dos componentes principales derivado de variables bioquímicas y de color de cáscara y de pulpa..... 58

Capítulo 2

- Figura 1.** Polimorfismos del primer HLG009 u..... 75
- Figura 2.** Dendrograma con las 31 accesiones de *Hylocereus spp.*..... 79
- Figura 3.** Análisis de coordenadas principales (PCoA) para 31 accesiones de *Hylocereus spp.* con 14 marcadores SSR..... 81
- Figura 4.** Valor de K=2 como el adecuado para la inferencia de la estructura de la población. 83

Figura 5. Estructura de la población inferida en K=2 sin información previa..	83
Figura 6. Huella genética de las 31 accesiones de <i>Hylocereus spp.</i> a partir de 14 marcadores moleculares SSR,.....	87
Figura 7. Matriz de disimilaridad según distancias euclídeas de accesiones de pitahaya (<i>Hylocereus spp.</i>).....	88

INTRODUCCIÓN GENERAL

Las pitahayas son cactáceas perennes, hemiepífitas (Valiente *et al.*, 2007), es decir, que pueden tener raíces ancladas al suelo. Como todas las cactáceas, son nativas de América (Bravo, 1978; Anderson, 2001) y tienen importancia histórica, cultural, ecológica y económica. Se conocen y utilizan como alimento, ornamentación y medicina desde hace milenios en regiones que hoy son parte de México.

El número de especies que pertenecen al género *Hylocereus* varía con el autor, García-Rubio *et al.*, 2015, mencionan 18 especies y Hunt (2006) 14. En México se distribuyen tres especies importantes por sus frutos (*H. undatus*, *H. Ocamponis*, *H. Purpussi*) (Livera *et al.*, 2010). En estos recursos genéticos de *Hylocereus* de México existe una diversidad amplia en características vegetativas y reproductivas. Los frutos son redondos u oblongos y varían en tamaño (de 200 a 1000 g), color y sabor. Su cáscara, que no tiene espinas como los de otras cactáceas, puede ser roja, púrpura o magenta, rosa, o amarilla, tiene brácteas y es atractiva visualmente. La pulpa es jugosa y puede ser blanca, rosa, roja, morada o magenta (Calix, 2004; Calix 2005; Castillo *et al.*, 2003 y 2005; Livera *et al.*, 2010, y tiene semillas pequeñas, negras, lisas y comestibles en una cantidad que en algunos genotipos varió de 3018 a 5098 (Castillo *et al.*, 2005). Las semillas son ricas en ácidos grasos esenciales, oleico y linoleico (Ariffin *et al.*, 2009).

Se distribuyen en regiones con altitud de pocos metros sobre el nivel del mar a más de 2500) con precipitación anual de 340 a 3500 mm (Cáliz de Dios, 2005; mireles), sin embargo, no tolera heladas (Livera-Muñoz, comunicación personal).

Aun cuando sus frutos tienen alto potencial económico, en el país no se les dio la importancia requerida para hacer con ellas un cultivo rentable y sostenible (Castillo y Ortiz, 1994, Castillo, 2006) .Pasó de planta silvestre o de huerto de traspatio a plantaciones hasta la década de los años 90, más tarde que Nicaragua y Colombia que establecieron sus plantaciones de pitahaya en los años setenta y ochenta, respectivamente, habiendo poca investigación para generar conocimiento, tecnología, variedades productivas con frutos de calidad, y estrategias para su conservación, por lo que se les señalaba como un recurso genético subutilizado (Castillo y Ortiz, 1994) con alto potencial económico (Ortiz-Hernández et al., 2012; Livera et al., 2010, Castillo, 2005).

Importancia de la fruta

Los frutos son considerados exóticos y tienen buenos precios y aceptación en los mercados nacionales e internacionales y su cultivo es una buena opción para los productores de México (Castillo, 2005; Livera *et al.*, 2010 y para los de otros países también (Mizrahi *et al.*, 2002; Marten 2003; Le Bellec *et al.*, 2006).

La especie más cultivada en México es *H. undatus*, que tiene cáscara o exocarpio color rojo púrpura y pulpa blanca (Castillo y Ortiz, 1994; Centurión *et al.*, 2008; Osuna *et al* 2011); sin embargo, existen otros tipos con colores de pulpa y cáscara que representan opciones para seleccionar productos de alta calidad para el mercado y subsanar los dos principales problemas predominantes en México: frutos y en Israel con bajo contenido de azúcares (8 °Brix) , poca acidez, y baja

productividad y el sabor poco dulce de la fruta posiblemente ha limitado su consumo en el país. (Livera *et al.*, 2010).

Hylocereus undatus se cultiva en otras regiones del mundo: en Oceanía (Australia y Nueva Zelanda), Asia (Malasia, Indonesia, Filipinas, Vietnam, Camboya, Tailandia, China, Corea, Taiwán, Japón e Israel), de Europa (España), Norte América (Estados Unidos y México), América Central (Guatemala, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá) y Sudamérica (Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú, Uruguay y Brasil) (Rodríguez, 1993; Mizrahi y Nerd, 1999; Xu *et al.*, 2019). Actualmente México no figura ni como consumidor ni como productor de pitahayas en el mercado mundial. En Colombia se cultiva principalmente *Hylocereus megalanthus* (*Selenicereus megalanthus*), de cáscara gruesa con espinas y pulpa dulce (18 °Brix).

Ahora que la pitahaya es más conocida y que se han documentado sus contenidos de vitamina C, minerales, y antioxidantes (Le Bellec *et al.*, 2006), hay mayor interés de promover su consumo y oferta en los mercados de los frutos exóticos. Su producción se está incrementando y difundiendo; en América los países que sobresalen son Colombia, México, Nicaragua, Ecuador, Estados Unidos y Brasil.

El ejemplo a seguir Vietnam, el principal exportador de frutas de pitaya en el mundo tiene casi 40.000 ha dedicadas al cultivo de esta especie, con un volumen de producción que alcanza alrededor de 1 millón de toneladas métricas (ADAWR, 2017; Ortiz y Takahashi, 2020).

En este contexto el futuro que se vislumbra para las pitahayas tiene dos escenarios principales: 1) Similar al de otras especies como el algodón, donde México que era rico en diversidad en unas cuantas décadas la perdió, siendo otros países quienes aprovecharon de mejor forma, quedando el país al margen de los beneficios que se derivan de su utilización; o como el caso del jitomate, donde las variedades utilizadas son importadas en su mayoría; o como el maíz, donde a pesar de la mega diversidad genética todavía existente, se importa la mitad de lo que consume el país. 2) Para un segundo escenario positivo, sería necesario implementar un plan estratégico que considere las necesidades de organización educación, financiación, mercadeo, etc. (Castillo y Ortiz, 1994) y teniendo como parte esencial variedades productivas con fruto de calidad que compita con otras frutas en el mercado nacional y con otras pitahayas en el internacional.

México es parte importante del centro de origen mesoamericano de las cactáceas pues se encuentran entre 550 y 900 especies de las cuales un 79 % son endémicas (García-Rubio *et al.*, 2015). Así, la pitahaya es originaria de regiones tropicales de América y se distribuye desde México hasta Centro América (Centurión *et al.*, 2008) y Sudamérica en donde constituye un recurso genético importante.

El género *Hylocereus* agrupa 18 especies que crecen en áreas templadas, tropicales, subtropicales y semiáridas de México, Centro América y Norte de Sudamérica (García-Rubio *et al.*, 2015). En México, Bravo-Hollis (1978) reconoció tres especies, *H. ocamponis*, *H. purpusii* Britton & Rose e *H. undatus* y mencionó la posible existencia de otras cuatro. En este sentido, las tres especies anteriores se distribuyen en los estados de Quintana Roo, Yucatán, Tabasco, Veracruz, Guerrero,

Querétaro, Estado de México, Puebla, Oaxaca, Michoacán, Jalisco, San Luis Potosí, Colima y Sinaloa (Guzmán *et al.*, 2007). En este sentido, para el año 2019, la producción de pitahaya nivel nacional fue de 9, 019.14 t con un rendimiento de 6.04 t ha⁻¹ y un valor de producción de \$ 172,323.79 pesos (SIAP, 2019). Quintana Roo y Yucatán fueron los mayores productores con 4,409.86 y 4,002.23 t, respectivamente, y solamente Yucatán superó el rendimiento promedio nacional con 11.61 t ha⁻¹ (SIAP, 2019). Así mismo, actualmente es cultivada en los países de América central y algunos otros sudamericanos como Colombia y Ecuador (Centurión *et al.*, 2008). También se ha difundido la producción y consumo en otras partes del mundo (Díaz, 2011), en Europa en países como Italia y España, sin embargo, su nicho en el mercado de frutas exóticas ha crecido recientemente en Israel, Australia, Vietnam, Malasia, Indonesia, Tailandia, Filipinas, Taiwán y Sri Lanka (Kishore, 2016).

En cuanto al análisis de los frutos de pitahaya, se han reportado oligosacáridos con propiedades prebióticas, tales como, resistencia a condiciones ácidas similares a las del estómago, resistencia parcial a la α -amilasa de la saliva humana y la capacidad para estimular el crecimiento de lactobacilos y bifidobacterias. También se considera una buena fuente de minerales, glucosa, fructosa, fibra dietética y vitaminas (Tenore *et al.*, 2012; Wichienchot, 2010; Díaz, 2011). La característica más notable de los frutos de pitahaya es la presencia de betalainas, con elevada actividad antioxidante (Figuroa *et al.*, 2011; Stintzing *et al.*, 2002; Herbach *et al.*, 2006; Wybraniec *et al.*, 2007).

Por otro lado, los estudios cromosómicos y genéticos en el género *Hylocereus* son recientes. En los primeros, algunos autores coinciden en que el número cromosómico predominante es $2n=2x=22$ habiendo algunos más tetraploides ($2n=44$) (Robles, 1990; Lichtenzveig *et al.*, 2000; Grimaldo-Juárez *et al.*, 2001). En el año 2011, Tel-Zur *et al.*, reportaron los primeros resultados de la autoploidización inducida en *H. monacanthus* ($2n=22$), *H. megalanthus* ($2n=44$) y un híbrido triploide interespecífico. Han sido pocos los estudios de diversidad genética, principalmente haciendo uso de técnicas de marcadores moleculares como los RAPD en *H. undatus* (Tel-Zur *et al.*, 2004; Legaria-Solano *et al.*, 2005; Junqueira *et al.*, 2010); ISSR en accesiones colectadas de China (Tao *et al.*, 2014); en este mismo país y más recientemente han sido caracterizados 44 genotipos de *Hylocereus* mediante microsatélites SSR (Pan *et al.*, 2017). Sin embargo, las herramientas biotecnológicas hoy en día han abierto el campo para estudios más detallados en el genoma de las especies de *Hylocereus*. El análisis de secuencias para la determinación de la huella genética es uno de ellos, y en este sentido, García-Aguilar *et al.*, (2013), secuenciaron tres regiones del cloroplasto y un espaciador intergénico para evaluar su utilidad como código de barras para *H. ocamponis* (Salm-Dick) Britton y Rose, *H. purpusii* (Weingart) Britton y Rose e *H. undatus* (Haworth) Britton y Rose, con el éxito de algunas combinaciones de estas regiones. Así mismo, otros autores como Cisneros *et al.*, (2013) han reportado nuevos híbridos interespecíficos e interploides a través del rescate embrionario. También hay trabajos en genómica como la hibridación introgresiva y la evidencia del flujo de genes reportado por Cisneros y Tel-Zur (2013); la identificación de genes expresados diferencialmente y potencialmente implicados en la respuesta a la

sequía en *H. undatus* mediante la supresión de hibridación sustractiva y microarreglos de ADNc (Fan *et al.*, 2014); y el aislamiento y caracterización de un gen de catalasa en la misma especie, así como su expresión bajo estrés abiótico (Nie *et al.*, 2015).

En este sentido, el conocimiento de técnicas de pre y postcosecha para el manejo de la calidad de los frutos de pitahaya es aún escaso, lo que dificulta su comercialización nacional e internacional. Actualmente el mercado mexicano de las pitahayas es básicamente regional; solamente se envían pequeñas cantidades al mercado nacional y cantidades incipientes a Europa y Japón (Centurión *et al.*, 2008). A pesar de la importancia comercial de la pitahaya y crecimiento mundial del cultivo, aún no se tiene un conocimiento profundo de la especie en varios campos de estudio, como conservación de la diversidad, variedades mejoradas, manejo tecnificado, mejoramiento de calidad de fruta y oferta de genotipos aptos para las diferentes regiones (Manzanero-Acevedo *et al.*, 2014).

Según Livera-Muñoz *et al.* (2010), la conservación *in situ* en México está gravemente amenazada por el deterioro de los ecosistemas, incluso en áreas naturales protegidas. La reducción y /o desaparición del ecotipo son causadas por el desplazamiento de la vegetación natural por los cultivos o el pastoreo de tierras, y el abandono de huertos debido a la migración de los productores. Este tipo de conservación también se realiza en solares o huertos familiares de Michoacán, Yucatán, Quintana Roo, Morelos, Puebla y Oaxaca, entre otros estados, donde también ocurre pérdida de germoplasma debido a cambios en el uso del suelo y

migración, entre otros factores. Con respecto a la conservación *ex situ*, la diversidad es conservada en las colecciones de clones de varias instituciones: Colegio de Postgraduados, Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR-Oaxaca), Universidad Autónoma De Quintana Roo y Universidad Autónoma Chapingo, principalmente. Estas instituciones han trabajado en relación con la recolección de germoplasma, evaluación, hibridación y selección. Su propósito es identificar y generar variedades productivas con fruta de alta calidad, dentro del contexto de conservación y el uso sostenible de sus recursos genéticos (Ortiz-Hernández *et al.*, 2012). En este sentido, en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, desde 1993 se lleva a cabo el proyecto: Recursos genéticos de *Hylocereus*: Conservación y Uso Sustentable, de donde se han identificado y generado genotipos sobresalientes, con alto potencial productivo (20 t ha^{-1} o más) y frutos de calidad (14-18 °Brix) (Livera-Muñoz *et al.*, 2010).

La caracterización, evaluación y documentación de los recursos genéticos de *Hylocereus* contribuyen al conocimiento sobre la conservación y uso sustentable de éstos. Con el uso de la biología molecular, se pueden caracterizar los genotipos o recursos genéticos sobresalientes utilizando marcadores genéticos moleculares para dar solidez a la identificación varietal y proporcionar bases científicas para la defensa de la propiedad intelectual. Esta investigación tiene como objetivos generar información sobre la calidad de fruto e identidad genética de genotipos sobresalientes que coadyuve a dar bases sólidas a su eventual registro y liberación a los productores y comprende los siguientes temas:

Evaluación de la calidad de fruto de pitahaya (*Hylocereus spp.*) en postcosecha con parámetros morfológicos, bioquímicos y de color.

Determinación de la variabilidad genética de genotipos selectos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) mediante microsatélites (SSR).

Obtención de la huella genética de los genotipos selectos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) mediante microsatélites (SSR).

Literatura citada

ADAWR, Australian Department of Agriculture and Water Resources. (2017). Final report for the review of biosecurity import requirements for fresh dragon fruit from Vietnam. Department of Agriculture and Water Resources, Canberra, Australia.

Azis, A. A., Bakar, J., Tan, C. P., Rahman, R. A., Karim, R., & Loi, C. C. (2009). Essential fatty acids of pitaya (dragon fruit) seed oil. *Food Chemistry*, 114(2), 561-564.

Bravo-Hollis, H. (1978). Las cactáceas de México. México: Universidad Nacional Autónoma de México XVI, Vol I. 743p

Britton N. L., & Rose J. N. (1963). The Cactacea: Descriptions and illustrations of plants of the cactus family. Vol. I. *Devor Publications*. New York, USA. 183-195 pp.

Castillo M.R., Ortiz H., Y.D. (1994). Floración y fructificación de *Hylocereus undatus* (pitahaya) en Zaachila, Oaxaca. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 17: 12-19.

Castillo, R. 2006. Aprovechamiento de la pitahaya: Bondades y problemáticas. *Caos Conciencia*, 1(1): 17–24.

Centurión Y. A. R., Pereira, S. S., Veloz, C. S., Sañudo, R. B., & Duch, E. S. (2008). Cambios físicos, químicos y sensoriales en frutos de pitahaya (*Hylocereus undatus*) durante su desarrollo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(1), 1-5.

Cisneros, A., & Tel-Zur, N. (2013). Genomic analysis in three *Hylocereus* species and their progeny: evidence for introgressive hybridization and gene flow. *Euphytica*, 194(1), 109-124.

Cisneros, A., García, R. B., & Tel-Zur, N. (2013). Creation of novel interspecific-interploid *Hylocereus* hybrids (*Cactaceae*) via embryo rescue. *Euphytica*, 189(3), 433-443.

Díaz, J. U. (2011). Biología y manejo postcosecha de Pitahaya roja y amarilla (*Hylocereus spp.*, y *Selenicereus spp.*). *La Calera*, 5(6), 44-49.

Esquivel, P. (2004). Los frutos de las cactáceas y su potencial como materia prima. *Agronomía mesoamericana*, 15(2), 215-219.

Esquivel, P., & Quesada, Y. (2012). Pitahaya (*Hylocereus sp.*): fruit characteristics and its potential use in the food industry. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3(1), 113-129.

Fan, Q. J., Yan, F. X., Qiao, G., Zhang, B. X., & Wen, X. P. (2014). Identification of differentially expressed genes potentially implicated in drought response in pitaya (*Hylocereus undatus*) by suppression subtractive hybridization and cDNA microarray analysis. *Gene*. 533(1), 322-331.

- Figueroa, R., Tamayo, J., González, S., Moreno, G., & Vargas, L. (2011). Actividad antioxidante de antocianinas presentes en cáscara de pitahaya (*Hylocereus undatus*). *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 12(1), 44-50.
- García Aguilar, M. D. L. A., Terrazas, T., Segura León, O., Arias, S., Vibrans, H., & López-Mata, L. (2013). Caracterización molecular de tres especies de *Hylocereus* (*Cactaceae*) presentes en México. *Revista fitotecnia mexicana*, 36(1), 13-22.
- García-Rubio, L. A., Vargas-Ponce, O., Ramírez-Mireles, F. D. J., Munguía-Lino, G., Corona-Oceguera, C. A., & Cruz-Hernández, T. (2015). Distribución geográfica de *Hylocereus* (*Cactaceae*) en México. *Botanical Sciences*, 93(4), 921-939.
- Grimaldo-Juárez, O., García-Velázquez, A., Ortiz-Cereceres, J., & Ruiz-Posadas, L. M. (2001). Características cariotípicas de seis genotipos de pitahaya. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 7(2), 177-195.
- Guzmán U., Arias S., & Dávila P. (2007). Catálogo de cactáceas mexicanas. UNAM-CONABIO. México, D. F. 315p.
- Herbach, K. M., Rohe, M., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2006). Structural and chromatic stability of purple pitaya (*Hylocereus polyrhizus* [Weber] Britton & Rose) betacyanins as affected by the juice matrix and selected additives. *Food Research International*, 39(6), 667-677.
- Junqueira, K. P., Faleiro, F. G., Bellon, G., Junqueira, N. T. V., Fonseca, K. G., Lima, C. A., & Santos, E. C. (2010). Variabilidade genética de acessos de pitaya com diferentes níveis de produção por meio de marcadores RAPD. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, 32(3), 840-846.
- Kim, HyoenJi; Choi, Hyung Kyoon; Moon, Jeong Yong; Kim, Young Suk; Mosaddik, Ashik & Cho, Somi Kim. (2011). Comparative antioxidant and antiproliferative activities of red and white pitayas and their correlation with flavonoid and polyphenol content. *Journal of Food Science*. 76(1):C38-C45.
- Kishore, K. (2016). Phenological growth stages of dragon fruit (*Hylocereus undatus*) according to the extended BBCH-scale. *Scientia Horticulturae*, 213, 294-302.
- Legaria-Solano, J. P., Alvarado-Cano, M. E., & Hernández, R. G. (2005). Diversidad genética en pitahaya (*Hylocereus undatus* Haworth. Britton y Rose). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(3).
- Lichtenzveig, J.; Abbo, S.; Nerd, A.; Tel-Zur, N.; Mizrahi, Y. 2000. Cytology and mating systems in the climbing cacti *Hylocereus* and *Selenicereus*. *American Journal of Botany*. 87(7): 1058-1065.
- Lim, H. K., Tan, C. P., Karim, R., Ariffin, A. A., & Bakar, J. (2010). Chemical composition and DSC thermal properties of two species of *Hylocereus* cacti seed oil: *Hylocereus undatus* and *Hylocereus polyrhizus*. *Food Chemistry*, 119(4), 1326-1331.

Livera-Muñoz, M., Ortiz-Hernández, Y. D., Castillo-Martínez, R., Castillo-González, F., Martínez-Chávez, R., Ramírez-Delgadillo, J. J., & Carrillo-Salazar, J. A. (2010). Pitahaya (*Hylocereus spp.*): problemas, logros y perspectivas. En Cruz-Izquierdo S, A. Muratalla L. y AT Kato Y.(comps.). *La investigación al servicio del campo mexicano. Ed. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética. Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Montecillo, Edo. de México pp, 69-71.*

Manzanero-Acevedo, L. A., Isaac-Márquez, R., Zamora-Crescencio, P., Rodríguez-Canché, L. G., Ortega-Haas, J. J., & Dzib, B. B. (2014). Conservación de la pitahaya [*Hylocereus undatus* (Haw.) Britton & Rose] en el estado de Campeche, México. *Foresta Veracruzana*, 16(1), 9-16.

Montesinos-Cruz, J. A., Rodríguez-Larramendi, L., Ortiz-Pérez, R., Fonseca-Flores, M. D. L. Á., Ruíz Herrera, G., & Guevara-Hernández, F. (2015). Pitahaya (*Hylocereus spp.*) un recurso fitogenético con historia y futuro para el trópico seco mexicano. *Cultivos Tropicales*, 36, 67-76.

Nie, Q., Gao, G. L., Fan, Q. J., Qiao, G., Wen, X. P., Liu, T., & Cai, Y. Q. (2015). Isolation and characterization of a catalase gene "HuCAT3" from pitaya (*Hylocereus undatus*) and its expression under abiotic stress. *Gene*, 563(1), 63-71.

Ortiz, T. A., & Takahashi, L. S. A. (2020). Pitaya fruit quality (*Hylocereus undatus* [Haworth] Britton & Rose) according to physiological maturity. A review. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 14(1), 63-75.

Ortiz-Hernández, Y. D., Livera-Muñoz, M., Carrillo-Salazar, J. A., Valencia-Botin, A. J., & Castillo-Martínez, R. (2012). Agronomical, physiological, and cultural contributions of pitahaya (*Hylocereus spp.*) in Mexico. *Israel Journal of Plant Sciences*, 60(3), 359-370.

Pan, L., Fu, J., Zhang, R., Qin, Y., Lu, F., Jia, L., ... & Liang, G. (2017). Genetic diversity among germplasms of Pitaya based on SSR markers. *Scientia Horticulturae*, 225, 171-176.

Robles, S. R. 1990. Terminología Genética y Filogenética. Ed. Trillas. D.F., México. 124 p.

Rodríguez-Canto, A. (2000). Producción y Comercialización de pitahayas en México. Rev. *Claridades Agropecuarias*, pp 3-22.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP (2019). Anuario estadístico de la producción agrícola. http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/

Stintzing, F. C., Schieber, A., & Carle, R. (2002). Betacyanins in fruits from red-purple pitaya, *Hylocereus polyrhizus* (Weber) Britton & Rose. *Food Chemistry*, 77(1), 101-106.

Tao, J., Qiao, G., Wen, X. P., Gao, G. L., Liu, T., Peng, Z. J., ... & Zhang, B. X. (2014). Characterization of genetic relationship of dragon fruit accessions

(*Hylocereus spp.*) by morphological traits and ISSR markers. *Scientia Horticulturae*, 170, 82-88.

Tel-Zur, N., Abbo, S., Bar-Zvi, D., & Mizrahi, Y. (2004). Clone identification and genetic relationship among vine cacti from the genera *Hylocereus* and *Selenicereus* based on RAPD analysis. *Scientia Horticulturae*, 100(1), 279-289.

Tel-Zur, N., Dudai, M., Raveh, E., & Mizrahi, Y. (2011). In situ induction of chromosome doubling in vine cacti (*Cactaceae*). *Scientia horticulturae*, 129(4), 570-576.

Tenore, G. C., Novellino, E., & Basile, A. (2012). Nutraceutical potential and antioxidant benefits of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) extracts. *Journal of Functional Foods*, 4(1), 129-136.

Wichienchot, S., Jatupornpipat, M., & Rastall, R. A. (2010). Oligosaccharides of pitaya (dragon fruit) flesh and their prebiotic properties. *Food Chemistry*, 120(3), 850-857.

Wu, Li Chen; Hsu, Hsiu Wen; Chen, Yun Chen; Chiu, Chih Chung; Lin, Yu In and Ho, Ja an Annie. 2006. Antioxidant and antiproliferative activities of red pitaya. *Food Chemistry*. 95(2):319-327

Wybraniec, S., Nowak-Wydra, B., Mitka, K., Kowalski, P., & Mizrahi, Y. (2007). Minor betalains in fruits of *Hylocereus* species. *Phytochemistry*, 68(2), 251-259.

CAPÍTULO I. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE FRUTO DE PITAHAYA DE GENOTIPOS SELECTOS (*Hylocereus spp.*)

1.1. RESUMEN

A pesar de la importancia comercial que han adquirido los frutos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) en los últimos años y el crecimiento mundial del cultivo, aún no se tiene un conocimiento profundo de la especie en varios campos de estudio, entre ellos la calidad postcosecha, lo que dificulta su comercialización nacional e internacional. En la presente investigación se evaluó la calidad de fruto de 11 genotipos de pitahaya a través del análisis de parámetros morfológicos, bioquímicos y de color. Los resultados indicaron que nueve de los 11 genotipos evaluados se ubican entre los tamaños medianos y grandes de clasificaciones internacionales. Así mismo, tuvieron altos porcentajes de llenado de pulpa, entre 68 y 87%, lo que representa una mayor porción comestible de fruta. La vida de anaquel de los frutos almacenados a temperatura ambiente se presentó con daños en cáscara por pardeamiento y dehiscencia de brácteas hasta después del día 8, y el día 10 el porcentaje de pérdida de peso fue menor a 11% en todos los genotipos. La relación SST/AT obtenida para los genotipos determinaron tres clases de frutos: índices de 33-36 con dulzor bien definido y acidez equilibrados; de 50-54 con sabores semidulces; y 57-61 con dulzor menos perceptible debido a porcentajes de AT por debajo de 0.250 y °Brix entre 12.5-15. Para Vitamina C, betalainas, fenoles totales y capacidad antioxidante dos genotipos con pulpa rosa obtuvieron los valores más altos. Por lo tanto, los 11 genotipos estudiados presentan atributos de alta calidad que brindan un alto potencial para competir en el mercado. La gama de variedades que se han desarrollado en el Colegio de Postgraduados logra reunir tamaño con buen llenado de pulpa. Tanto el equilibrio como las desviaciones mínimas que presentan entre dulzor y acidez pueden cubrir los distintos gustos de los consumidores, con frutos dulces, semidulces y/o agridulces, y además poseen metabolitos con alta capacidad antioxidante benéficos para la salud.

Palabras clave: Pitahaya, Calidad postcosecha, Vitamina C, Betalainas, Fenoles Totales, Capacidad antioxidante

1.2. SUMMARY

Despite the commercial importance that dragon fruit (*Hylocereus spp.*) have acquired in recent years and the worldwide growth of the crop, there is still no in-depth knowledge of the species in several fields of study, including postharvest quality, which difficult its national and international commercialization. In this study, the fruit quality of 11 dragon fruit genotypes was evaluated through the analysis of morphological, biochemical and color parameters. The results indicated that nine of the 11 genotypes evaluated fall between the medium and large sizes of international classifications. Likewise, they had high percentages of pulp filling, between 68 and 87%, which represents a greater edible portion of fruit. The shelf life of the fruits stored at room temperature presented with skin damage due to browning and bract dehiscence until after day 8, and on day 10 the percentage of weight loss was less than 11% in all genotypes. The SST/AT relationship obtained for the genotypes determined three classes of fruits: indices of 33-36 with well-defined sweetness and balanced acidity; 50-54 with semi-sweet flavors; and 57-61 with less noticeable sweetness due to AT percentages below 0.250 and °Brix between 12.5-15. For Vitamin C, betalains, total phenols and antioxidant capacity, two genotypes with pink pulp obtained the highest values. Therefore, the 11 genotypes studied present high quality attributes that provide high potential to compete in the market. The range of varieties that have been developed in the Postgraduate College manages to gather size with good pulp filling. Both the balance and the minimum deviations between sweetness and acidity can cover the different tastes of consumers, with sweet, semi-sweet and bittersweet fruits, and also have metabolites with high antioxidant capacity that are beneficial to health.

Keywords: Dragon Fruit, Postharvest quality, Vitamin C, Betalains, Total Phenols, Antioxidant Capacity.

1.3. INTRODUCCIÓN

Entre las plantas más notables que caracterizan el paisaje de las zonas áridas de México junto con los magueyes, los mezquites y las yucas, están las cactáceas. Dentro de esta familia, en la subfamilia *Cactoideae* se encuentra el género *Hylocereus* que tiene gran potencial económico y productivo, cuyos frutos se conocen en Latinoamérica como pitayas o pitahayas (Bravo-Hollis, 1978; Esquivel, 2004). Aunque los estudios de taxonomía aún se consideran inconclusos para determinar el número de especies del género *Hylocereus* (García-Rubio *et al.*, 2015) el número de especies aceptadas más recientemente, según Hunt (2006), es de 14.

Le Bellec *et al.* (2006) mencionan que el valor ornamental de estas plantas se debe a sus grandes flores (15-25 cm) que florecen en la noche; son blancas y cremosas en color, excepto *H. stenopterus* y *H. extensus* cuyos pétalos son rojos y rosados. Además, tiene tallos modificados (filocladodios) que realizan la fotosíntesis, raíces adventicias, y una fruta ovoide con cáscara que tiene color rojo, rosa o amarilla cuando madura, con brácteas, y pulpa blanca, roja, rosa, púrpura o carmesí y amarillo pálido, dependiendo del cultivar, y contiene pequeñas semillas negras comestibles (Wichienchot *et al.*, 2010).

Los frutos de *Hylocereus spp.*, son considerados no climatéricos, por lo que el índice de madurez más determinante es el color de la cáscara, cuando tiene una coloración completamente roja (Nerd *et al.*, 1999). Otros aspectos importantes durante el momento de la cosecha son el contenido de sólidos solubles (°Brix), acidez, y el

tiempo que transcurre desde la floración hasta la cosecha (alrededor de 32 días) (Esquivel, 2004).

Se considera que los sólidos solubles totales (SST o °Brix) comprenden la mayoría de los azúcares (70-85 %), con una pequeña cantidad de lípidos, nitrógeno y compuestos que contienen fósforo (Vázquez, 2006). Los cambios ocurridos en azúcares y ácidos grasos ocurren por la degradación de los carbohidratos como el almidón, lo cual ha sido asociado con la maduración, alterando el gusto y la textura de los productos. En los frutos no climatéricos la acumulación de azúcares está vinculada al desarrollo de la calidad óptima comestible (Hernández-Estrada, 2012). Nomura *et al.* (2005) reportaron al ácido málico como el de mayor presencia en los frutos de *H. undatus* con más del 90 % de los ácidos del fruto, con pequeñas cantidades de ácido cítrico y ácido ascórbico, y a diferencia de los azúcares solubles, no encontraron diferencias consistentes entre las distintas secciones de fruta.

Los cambios bioquímicos y fisiológicos de los frutos de pitahaya dependen del estado de madurez en que fueron cortados y de la temperatura y el tiempo de almacenamiento (Vázquez, 2006). Según Arévalo y Ortiz (2004), por la naturaleza no climatérica de la pitahaya su cosecha debe realizarse en madurez de consumo y no fisiológica, además, destacan la importancia de mejorar la relación °Brix/acidez pues existe un problema importante debido a la baja acidez del fruto que no permite percibir su dulzor. Por lo anterior, la relación °Brix/acidez se ha convertido en un parámetro de calidad para el gusto consumidor. Centurión *et al.*, (2008), señalan que aunque los días de cosecha pueden variar de acuerdo a la zona de producción,

las preferencias de consumo en las frutas se orientan en las características con mayor cantidad de sólidos solubles, azúcares reductores y relación °Brix/acidez, donde las preferencias son para los frutos cortados entre 29 y 31 días; la última fecha se considera el límite antes de que el fruto comience a agrietarse o descomponerse aún en la planta, y en esa misma fecha con 0.4% de acidez y 35.5 de relación °Brix/acidez es mayor la aceptación por el consumidor.

Autores como Stintzing *et* (2003) y Vaillant *et* (2005) consideran que el contenido de vitamina C en los frutos de *Hylocereus* es bajo. Ladaniya (2008), explica que los ácidos málico y cítrico disminuyen durante la maduración del fruto, ya que se usan para la síntesis de nuevos compuestos aromáticos y de sabor. Las betalaínas son pigmentos nitrogenados solubles en agua que usualmente se encuentran en las vacuolas de las plantas (Esquivel y Quesada, 2012). Estas se dividen en betacianinas y betaxantinas. Las primeras son glucósidos o acilglucósidos de betanidina, formados a partir de ácido betalámico y ciclo-DOPA, mientras que las betaxantinas son productos de condensación del ácido betalámico con aminas o aminoácidos (Strack *et al.*, 2003). Este grupo de pigmentos ha adquirido mayor importancia en los últimos años debido a la demanda de colorantes naturales por encima de los artificiales en las industrias alimentaria y textil. Las propiedades que hacen de las betalainas una clase de pigmentos ideales para el uso alimentario es su estabilidad en un rango más amplio de pH (3 a 7) y su potencial de regeneración después de un tratamiento térmico, lo que no sucede con las antocianinas (Celli y Brooks, 2017). Aunado a lo anterior, a las betalainas se les atribuye propiedades con efectos asociados a la salud como la capacidad antioxidante, efectos

antimicrobianos, antiproliferativos, entre otros beneficios (Tenore *et al.*, 2012; Kumar *et al.*, 2015; Celli y Brooks, 2017; Haqvi y Husnain, 2020).

El conocimiento de técnicas de pre y postcosecha para el manejo de la calidad de los frutos de pitahaya es aún escaso, lo que dificulta su comercialización nacional e internacional. Actualmente el mercado mexicano de las pitahayas es básicamente regional; solamente se envían pequeñas cantidades al mercado nacional y cantidades incipientes a Europa y Japón (Centurión *et al.*, 2008). A pesar de la importancia comercial de la pitahaya y crecimiento mundial del cultivo, aún no se tiene un conocimiento profundo de la especie en varios campos de estudio, como conservación de la diversidad, variedades mejoradas, manejo tecnificado, mejoramiento de calidad de fruta y oferta de cultivares para diferentes regiones (Manzanero-Acevedo *et al.*, 2014). El presente estudio tuvo como objetivo el análisis de la calidad de fruto de pitahaya (*Hylocereus spp.*) a través de variables morfológicas, bioquímicas y de color.

1.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Se recolectaron frutos de once genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) de 4 años establecidos en la localidad de San Rafael, Veracruz, (Latitud: 20.183, Longitud: -96.867 20° 10' 59" Norte, 96° 52' 1" Oeste). Ocho de ellos tienen frutos con cáscara rosa y tres la tienen amarilla (Cuadro 1). Los frutos se cosecharon cuando tenían 75% de la superficie de la cáscara rosa o amarilla. y se llevaron al Laboratorio de Postcosecha del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, para su análisis.

Cuadro 1. Genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) utilizados en el estudio

Genotipo	Cáscara	Pulpa
CP-182	Amarilla	Blanca
CP-195	Amarilla	Blanca
CP-203	Amarilla	Blanca
CP-136	Rosa	Blanca
CP-140	Rosa	Blanca
CP-171	Rosa	Blanca
CP-175	Rosa	Blanca
CP-128	Rosa	Rosa
CP-169	Rosa	Rosa
CP-178	Rosa	Guinda
CP-300	Rosa	Rosa

Variables bioquímicas

La determinación de variables bioquímicas se realizaron los análisis por triplicado en cada genotipo. Los sólidos solubles totales (°Brix) y la acidez titulable (% ácido málico) se midieron mediante la metodología descrita por la AOAC (1990). La vitamina C ($\mu\text{g ml}^{-1}$) se determinó mediante espectrofotometría UV/VIS con el reactivo Folin-Ciocalteu en vegetales según la metodología descrita por Jagota y Dani (1982), con algunas modificaciones. Para determinar la capacidad antioxidante se siguió el método de Kim *et al.* (2002) con el reactivo DPPH, con algunas modificaciones. La capacidad antioxidante fue representada como capacidad de barrido del radical (RSC) remanente antes de cada tiempo de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ RSC} = (A_0 - A_r) / A_0$$

Donde:

A₀ representa la absorbancia de DPPH sin muestra en el tiempo cero.

A_r es la absorbancia de cada muestra a los 10, 20, 30 y 60 min después de la adición de la solución de DPPH. El valor de A₀ es considerado como 100 %.

El contenido de betalaínas (betacianinas y betaxantinas mg 100 g⁻¹ de pulpa) se midió con la metodología de García-Cruz *et. al.* (2012), por medio de espectrofotometría UV/VIS, con la siguiente fórmula:

$$B (mg/g) = (A \times FD \times PM \times V)/(E \times P \times L)$$

Donde:

B = Betacianina (rojo purpura) o betaxantinas (amarillo-anaranjado)

A= Absorbancia a 538 nm para betacianinas y 483 nm para betaxantinas.

FD= Factor de dilución al momento de leer en el espectrofotómetro.

PM= Peso molecular (Betanina=550 g mol⁻¹), (Indicaxantina=308 g mol⁻¹).

V= Volumen del extracto. 30 ml volumen total.

E= Coeficiente de extinción: (Betalaina = 60 000 L mol⁻¹), (Indicaxantina= 48 000 L mol⁻¹)

L= Longitud de la ceda (1 cm)

Betacianinas-rojo púrpura 535-550 nm (betanina, isobetanina fruto entero 16.6-624 mg/100 g expresado como betanina)

Betaxantinas 475-480 nm (indicaxatina) 9.96 mg 100 g⁻¹.

Para la cuantificación de fenoles totales (mg L^{-1} ácido gálico) se siguió la metodología con Folin-Ciocalteu descrita por Singleton, *et al.* (1999).

Variables morfológicas

Para determinar el peso total se pesaron individualmente cinco frutos por genotipo en una balanza digital PCE-BSH 6000. Posteriormente, se registró el peso de los frutos por 10 días consecutivos para calcular el porcentaje de pérdida de peso por genotipo. Los frutos frescos se resguardaron durante el experimento en condiciones de almacenamiento con una temperatura promedio de $22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa de 56 %.

Para determinar la forma del fruto se midieron los diámetros ecuatorial (DE) y polar (DP) de tres frutos por genotipo y se registraron los valores en milímetros (mm). Así mismo, se calculó la relación de diámetros ecuatorial/polar para determinar los tamaños/dimensiones de frutos por genotipo, donde se elaboró una escala propia (Cuadro 2).

Cuadro 2. Escala de clasificación para forma de fruto de pitahaya, según el índice ecuatorial y polar (elaboración propia).

Rel. DE/DP	Forma
$< \text{ó} = 0.500$	Alargado
0.501-0.685	Ovalado
0.686-1	Redondo

Para la densidad y forma de brácteas se tomaron 3 frutos por genotipo, y se contó el número de brácteas por fruto. Así mismo, se midieron la base y el largo de tres brácteas por cada fruto muestreado por genotipo, es decir, 9 brácteas por cada genotipo, se registraron las medidas en milímetros (mm) y se elaboró una escala de clasificación (Cuadro 3).

Cuadro 3. Escala de clasificación para forma de brácteas de pitahaya, según el índice base y largo (elaboración propia).

Rel. B/L	Forma
0.5-0.63	Espada
0.64-0.80	Mayoría espada
0.81-0.95	Mayoría triangular
> 0.96	Triangular

Variables de color

El color de fruto fue medido con un colorímetro portátil NR110 (Shenzhen 3nh Tech., China), para lo cual se tomaron lecturas directas en pulpa y cáscara de los genotipos estudiados. El patrón de color para pulpa y cáscara se expresó en luminosidad (L), chroma ($C = (a^2 + b^2)^{1/2}$) y ángulo de tono (hue) [$h^\circ = \arctan b/a$].

Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza y comparaciones de medias con prueba de Tukey (0.05) (IBM SPSS Statistics 20, USA), con tres repeticiones para las mediciones y de 3 a 5 frutos por genotipo para determinar la significancia estadística. Se calcularon coeficientes de correlación de *Pearson* para algunas variables morfológicas, bioquímicas y de color. Así mismo, se realizaron análisis de componentes principales para todas las variables del estudio (IBM SPSS Statistics 20, USA).

1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los frutos fueron cosechados a 100 % de madurez de cáscara basado en la predominancia de color rosa sobre verde en los genotipos CP-175, CP-171, CP-140, CP-136, CP-169, CP-128, CP-300 y CP-178, y la predominancia de color amarillo sobre el verde en los genotipos CP-203, CP-195 y CP-182.

Variables morfológicas

Peso de fruto

Las características morfológicas de los frutos representan el primer atractivo para cualquier consumidor, por lo que todas las variables que dan la apariencia deben ser especialmente cuidadas. Las variables morfológicas evaluadas en 11 genotipos de pitahaya se muestran en el Cuadro 4. Para la variable de peso completo de fruto las accesiones con menor peso fueron CP-169 con 242.67 g, y el mayor peso lo obtuvieron los frutos del genotipo CP-171 con 494.72 g. Este último valor es mayor a los 469.2 g reportados por Centurión *et al.* (2008), 437.5 g de Nerd *et al.* (1999),

436.84 g de Soares-Magalhaes *et al.* (2019), 430 g resultado de Esquivel *et al.* (2007), 405 g para pitahaya de pulpa blanca y 290 g para pitahaya de pulpa rosa reportados por Wichienchot *et al.* (2010), así como lo reportado por Chik *et al.* (2011) de 475 g en frutos de pulpa rosa y 493 g en pulpa blanca. Según el PNS (Philippine National Standard) (Rodeo *et al.*, 2018), dentro de su clasificación de tamaño de fruto de pitahaya basados en el peso total, los genotipos evaluados en este estudio se colocan en 3 diferentes rangos: los genotipos con frutos pequeños (S) son CP-195 y CP-169; los medianos (M) CP-203, CP-182, CP-136, CP-128 y CP-300; los frutos grandes (L) son los producidos por los genotipos CP-175, CP-178, CP-171 y CP-140. Por otra parte, el Codex Alimentarius (2007) para frutos de pitahaya (237-2003) clasifica y hace la diferencia entre los frutos amarillos y los frutos de pulpa blanca y rosa, donde los genotipos de cáscara amarilla CP-195 y CP-182 se colocan en la clasificación D y el CP-203 en E, siendo mejor clasificado este último. Los genotipos de pulpa blanca o rosa se colocaron en las clasificaciones, de la más baja a la más alta, C, E y F. En C se encuentra el CP-169, en E están CP-136, CP-300 y CP-128, y en F se colocan CP-175, CP-171, CP-140 y CP-178.

Peso de pulpa y cáscara

El fruto de pitahaya es no climatérico, por lo que se han utilizado distintos criterios para determinar el estado óptimo para la cosecha. La acumulación de pulpa durante el desarrollo del fruto en la planta es uno de estos criterios basado, así mismo, en los días después de la antesis Centurión *et al.* (2008). El genotipo con mayor y menor peso de pulpa fueron el CP-171 con 378.65 g y el CP-169 con 202.63 g, respectivamente. Así mismo, los genotipos con mayor y menor peso en cáscara

fueron CP-140 con 154.14 g y CP-169 con 40.04 g, respectivamente. La relación de pulpa y cáscara resultó mayor estadísticamente en el CP-203 con 6.53 (86.72 % pulpa), y menor en el CP-140 con 2.15 (68.25 % de pulpa). Otros autores como Centurión *et al.* (2008) obtuvieron una relación pulpa/cáscara de 3.9, con un porcentaje de la porción comestible de 79.6 %. Nerd *et al.* (1999) reportaron 67.5 % de pulpa y obtuvieron una relación pulpa/cáscara de 3.81 máximo y 2.99 mínimo, con 79.43 y 75.93 % de pulpa, respectivamente. Esquivel *et al.* (2007) encontraron porcentajes de pulpa de 55 a 74 % en sus genotipos estudiados. Por otra parte, Soares-Magalhaes *et al.* (2019) registraron un porcentaje máximo de 74.82 % de porción comestible, así como otros autores con resultados similares: 73 % de Márquez *et al.* (2005), 79 % reportado por Osuna-Enciso *et al.* (2007) y Lima *et al.* (2014) describen porcentajes entre 65 y 78.2%. Lo anterior tiene dos puntos importantes, por un lado, un alto porcentaje de pulpa representa más porción comestible que es uno de los atributos más buscados por los consumidores, y, por otro lado, como mencionan Centurión *et al.* (2008), un porcentaje alto de pulpa con respecto al peso del fruto sugiere una cáscara más delgada, lo que contribuye a que el fruto sea más sensible a problemas de agrietamiento y daños en postcosecha.

Forma de fruto

Por otra parte, la forma del fruto se determinó mediante una escala de elaboración propia, donde la relación del diámetro ecuatorial y el diámetro polar de cada genotipo fue clasificada como se muestra en el Cuadro 2, de tal manera que, por ejemplo, CP-136 con 0.892, resultó el genotipo con mayor índice, lo que indicó que cerca de la unidad los frutos son redondos. Contrariamente, los frutos de los

genotipos CP-182 y CP-195 registraron un índice promedio de 0.416 y 0.476, respectivamente, y cuantitativamente más lejanos a la unidad, lo que indicó frutos alargados, sin embargo, la mayoría de los genotipos, según la escala, fueron de forma ovalada (Figura 1). Algunos autores como Chowdhury *et al.* (2020) cuyos datos calculados de diámetro y longitud de fruto resultaron en una relación de 0.663 y 0.773, para dos accesiones manejadas en el estudio y en la escala elaborada en este trabajo serían clasificados como ovalados y redondos, respectivamente. Soares-Magalhaes *et al.* (2019) reportaron un índice de 1.26 y cuyos frutos fueron clasificados como sub-globulares. Wichienhot *et al.* (2010) mostraron los datos de longitud y diámetro para calcular el índice de frutos de pulpa blanca y de pulpa rosa, respectivamente se obtuvieron 0.701 y 0.519, que en la escala de la presente investigación serían frutos redondos y ovalados.

Forma de brácteas

Para determinar la forma de brácteas se elaboró una escala basada en la relación de medida entre la base y el largo de éstas (Cuadro 3). Cabe señalar que este estudio es el primero en reportar dichas características del fruto de pitahaya a través de una escala de elaboración propia que consiste en cuatro clasificaciones principalmente: brácteas triangulares, brácteas mayoría triangulares, brácteas mayoría espada y brácteas en forma de espada. Dados los datos, los mayores índices se obtuvieron en los genotipos CP-136 y CP-128 con 1.351 y 1.165, respectivamente, los cuales fueron clasificados con brácteas tipo triangular. Por otra parte, los genotipos con valores menores fueron CP-300 y CP-175 con 0.605 y 0.624, respectivamente, y fueron clasificados como frutos con brácteas en forma de

espada. La categoría con más genotipos fue la de brácteas mayoría espada con el CP-178, CP-171, CP-203, CP-140 y CP-195 que presentaron menor número de brácteas en forma triangular localizadas principalmente en la base del fruto. Así mismo, en la categoría de brácteas mayoría triangulares los genotipos CP-182 y CP-169 presentaron pocas brácteas en forma de espada localizadas en el polo superior del fruto (Figura 2).

Densidad de brácteas, estomas y pérdida de peso

Las brácteas de los frutos de pitahaya son parte de su gran atractivo visual, y la densidad de éstas supone tiene que ver con el genotipo. Así, en este estudio el CP-300 tuvo un número significativamente mayor de brácteas a comparación de todos los demás evaluados (11). Los genotipos CP-182, CP-175 y CP-136 tuvieron menor densidad de brácteas con 15, 16 y 16, respectivamente. Por otro lado, durante 10 días de almacenamiento los frutos de algunos genotipos perdieron un porcentaje de peso más significativo que otros, tal es el caso del CP-175 que perdió 10.86% y fue el genotipo con mayor pérdida, seguido de CP-203 y CP-195, con 9.76 y 9.51 por ciento, respectivamente. Por el contrario, el CP-300 solamente perdió 5.66% de su peso en el mismo periodo, seguido por el CP-182 con 6.44% (Figura 3). Arévalo-Galarza y Ortiz-Hernández (2004) demostraron que al cosechar los frutos de pitahaya mientras la frecuencia respiratoria disminuye, la pérdida de peso aumenta y esto se refleja en un marchitamiento visible en cáscara y brácteas en el octavo día, con porcentajes de pérdida de peso aproximadamente de 5% y a partir del cual el daño en fruto es irreversible. El presente estudio concuerda con lo anterior, en el octavo día de almacenamiento los frutos de los distintos genotipos rondaban el 5%

de pérdida de peso, y en los dos últimos días ésta se disparó hasta más del doble, como en el CP-175. Osuna-Enciso *et al.* (2011) observó 5% de pérdida de peso en frutos de pitahaya con madurez inicial al séptimo día, y en frutos con madurez media y completa a los 10 y 11 días, respectivamente.

Los estomas regulan la pérdida de agua y su cierre responde a la disminución de la humedad en el ambiente (Sánchez *et al.*, 2013). Mizrahi (2015) menciona que las cáscaras de la pitahaya contienen estomas activos, y estos están más concentrados en las brácteas que en las otras partes de la piel de la fruta y por lo tanto, tiene una mayor susceptibilidad a marchitarse debido a la rápida pérdida de agua. Al respecto, el índice estomático en brácteas resultó más significativo que en el resto de la cáscara del fruto, así mismo resultó al comparar los datos de brácteas con el porcentaje de pérdida de peso (Cuadro 5). Así, el genotipo que presentó mayor densidad estomática en brácteas, así como mayor índice estomático en las mismas fue el CP-175 con 10.28 y 5.33, respectivamente. El genotipo que presentó menor valor en ambas variables fue el CP-182 con 1.67 y 0.75, respectivamente. Al respecto, otros autores como Sánchez *et al.* (2013) obtuvieron una densidad estomática de 1.43 en frutos de *Hylocereus megalanthus*.

El CP-175 fue el genotipo que perdió más peso durante el almacenamiento de 10 días, con 10.86%, y el CP-182 fue el segundo genotipo con menor pérdida de peso con 6.44%. El CP-300 fue el segundo genotipo con menor densidad estomática en brácteas (2.78), así como índice estomático en las mismas (1.20), sin embargo, fue el genotipo que presentó mayor número de brácteas en fruto con 31, y fue el que perdió menos peso a lo largo de 10 días de almacenamiento. De los genotipos con

densidad estomática mayor a 6 y número de brácteas superior a 20 por fruto, solamente el CP-203 y CP-195 perdieron mayor peso. No así el CP-178, que, aunque resultó con densidad estomática en brácteas de 6.22 y es el segundo genotipo con más brácteas por fruto, solamente perdió 7.59% de peso. Según el cuadro 6, la pérdida de peso tiene una alta correlación con el índice estomático en brácteas, más que el número de brácteas en fruto.

Aunado a lo anterior, según Teixeira *et al.* (2005), en *Platonia insignis*, concluyeron que la mayor pérdida de peso en frutos cosechados inmaduros se debió a que poseen cutícula más delgada que los frutos cosechados maduros. Así, aunque en el presente estudio se cosecharon los frutos a un 100% de coloración en cáscara, considerados como frutos en madurez, el grosor y dureza de la cáscara y las brácteas varió según el genotipo, al igual que el número de brácteas en fruto, donde, por ejemplo, el CP-178 fue el genotipo con mayor grosor y dureza de cáscara al tacto, no así el CP-300, que sin embargo poseía mayor número de brácteas, lo que podría sugerir que es una combinación del grosor de cáscara y brácteas, así como la densidad e índice estomáticos las variables que más impactan sobre la pérdida de peso, más que la variable de número de brácteas presentes en el fruto.

Cuadro 4. Variables morfológicas de frutos de pitahaya (*Hylocereus spp.*).

ACCESIÓN	PESO PROMEDIO	PESO PULPA	PESO CÁSCARA	REL. PULPA/CASC	FORMA FRUTO (REL. DE/DP)	FORMA BRÁCTEAS (REL. B/L)	NÚMERO DE BRÁCTEAS
CP-203	393.67 ± 65.19 abcd	341.39 ab	52.28 ef	6.53 a	0.560 cd	0.718 bc	21 ± 1.53 abc
CP-182	348.08 ± 44.53 bcde	272.75 bc	75.32 de	3.62 c	0.416 d	0.842 ab	15 ± 2.89 c
CP-195	278.77 ± 80.96 de	202.72 c	76.04 de	2.67 d	0.476 cd	0.770 bc	20 ± 3.51 abc
CP-175	448.26 ± 41.95 abc	351.44 ab	96.82 cd	3.63 c	0.679 abc	0.624 c	16 ± 5.57 c
CP-171	494.72 ± 36.69 a	378.85 a	115.86 bc	3.27 c	0.653 bc	0.663 bc	18 ± 1.15 bc
CP-140	485.63 ± 23.33 ab	331.49 ab	154.14 a	2.15 e	0.648 bc	0.773 bc	18 ± 1 bc
CP-136	389.70 ± 74.21 abcd	322.01 ab	67.69 def	4.76 b	0.892 a	1.351 a	16 ± 5.03 c
CP-128	330.9 ± 79.12 cde	284.47 abc	46.43 ef	6.13 a	0.688 abc	1.165 ab	20 ± 3.06 abc
CP-300	355.19 ± 75.75 abcde	259.53 bc	95.65 cd	2.71 d	0.597 bcd	0.605 c	31 ± 3.51 a
CP-169	242.67 ± 34.11 e	202.63 c	40.04 f	5.06 b	0.812 ab	0.925 ab	20 ± 6.35 abc
CP-178	469.7 ± 47.40 abc	338.65 ab	131.05 ab	2.58 d	0.612 bcd	0.653 bc	29 ± 2.89 ab

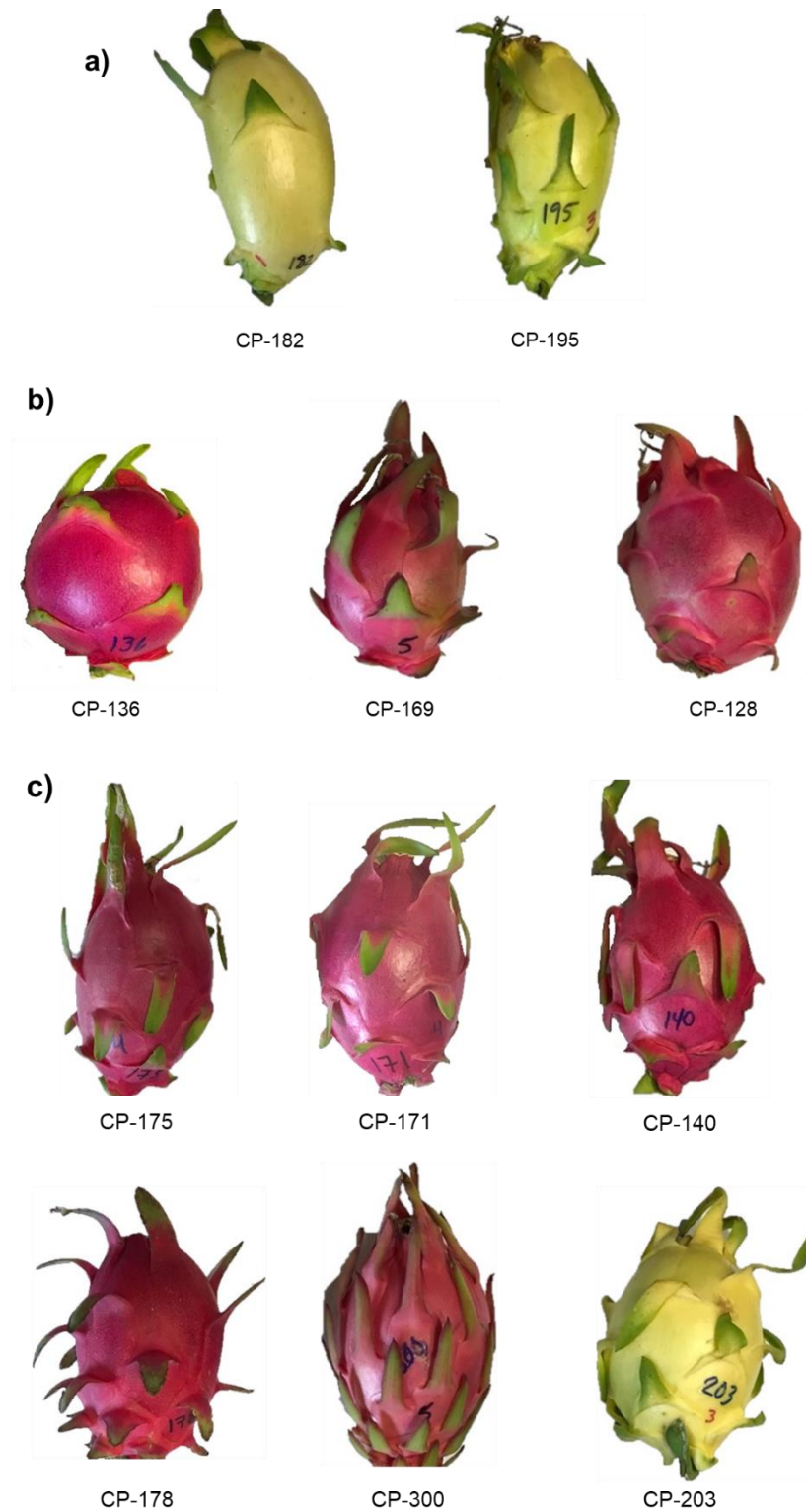


Figura 1. Forma de fruto: a) frutos alargados (Menor o igual a 0.500); b) frutos redondos (0.686-1); c) frutos ovalados (0.501-0.685). Clasificación propia (Cuadro 2).

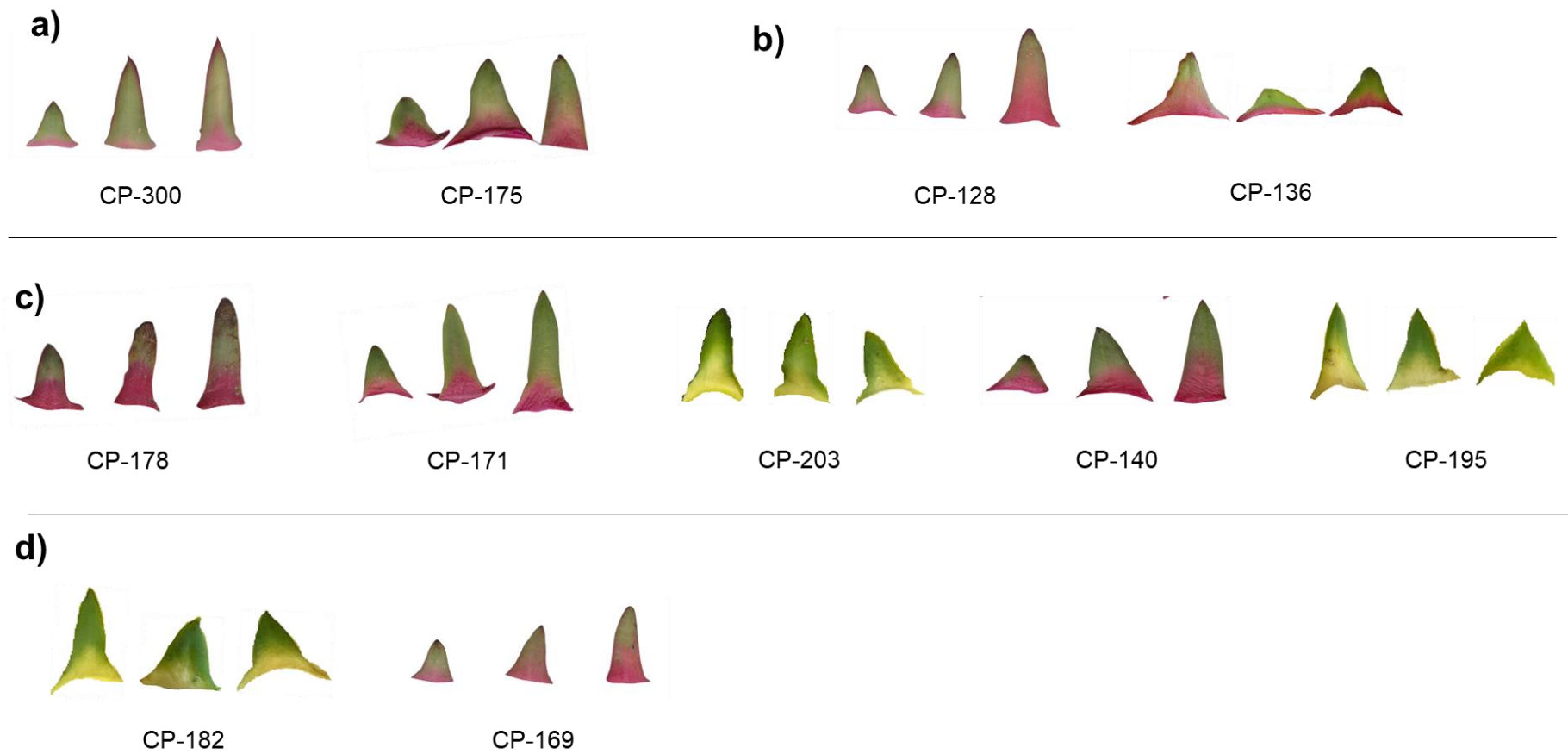


Figura 2. Forma de brácteas: a) brácteas en forma de espada (0.50-0.63); b) brácteas en forma triangular (0.96-1.43); c) brácteas mayoría en forma de espada (0.64-0.80); d) brácteas mayoría en forma triangular (0.81-0.95). Clasificación propia (Cuadro 3).

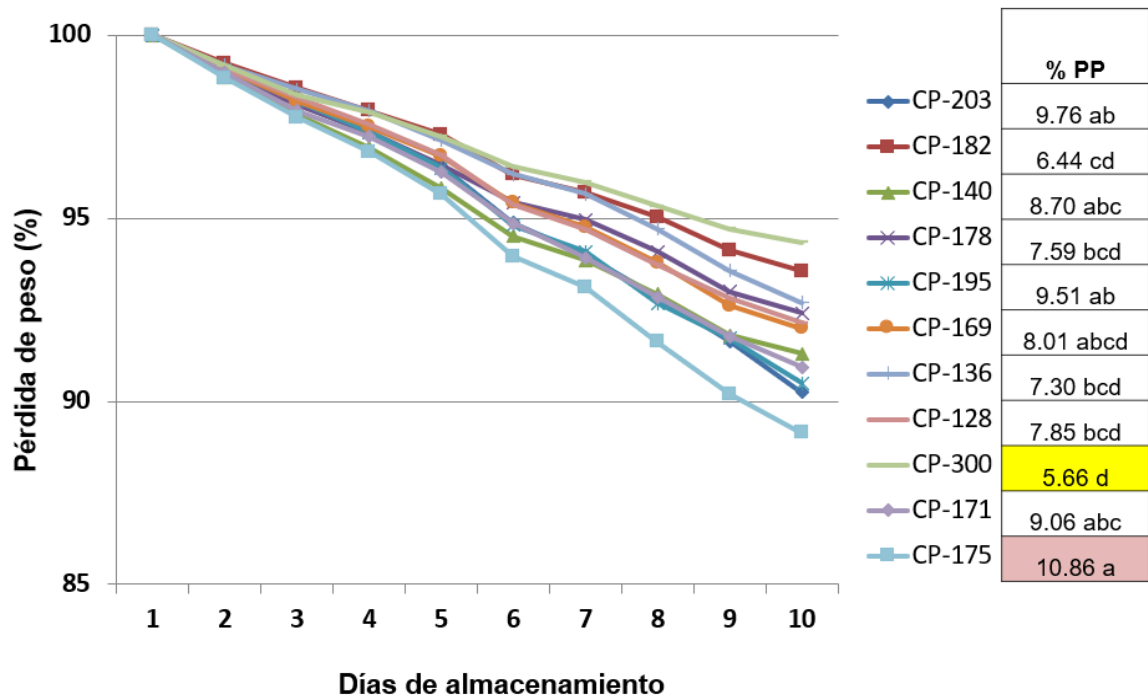


Figura 3. Porcentaje de pérdida de peso de 11 genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) después de 10 días de almacenamiento (Temperatura 22.5 °C, HR 56%) (Tukey 0.05).

Cuadro 5. Estomas en brácteas y pérdida de peso de 11 genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*).

Genotipo	DE en Brácteas	No. Brácteas	IE en Brácteas	% PP
CP-182	1.67 d	15 c	0.75	6.44 cd
CP-203	7.22 b	21 abc	3.09	9.76 ab
CP-195	6.50 b	20 abc	4.06	9.51 ab
CP-175	10.28 a	16 c	5.33	10.86 a
CP-140	2.94 cd	18 bc	1.39	8.70 abc
CP-171	7.61 b	18 bc	4.01	9.06 abc
CP-136	3.61 cd	16 c	1.59	7.30 bcd
CP-169	4.06 c	20 abc	1.74	8.01 abcd
CP-128	3.22 cd	20 abc	1.67	7.85 bcd
CP-300	2.78 cd	31 a	1.20	5.66 d
CP-178	6.22 b	29 ab	2.64	7.59 bcd

Cuadro 6. Valores de correlación de Pearson para variables de pérdida de peso, estomas en brácteas y número de brácteas en fruto de pitahaya (*Hylocereus spp.*). Nivel de significancia de 0.05 bilateral.

	Número de Brácteas	Pérdida de Peso	Estomas en Brácteas	Índice estomático en brácteas
Número de Brácteas	1			
Pérdida de Peso	-.421	1		
Estomas en Brácteas	-.111	.824	1	
Índice estomático en brácteas	-.162	.850	.980	1

Análisis de componentes principales para variables morfológicas

En el análisis de componentes principales se mostró que 63.6 % de la variación es explicada por los dos primeros componentes principales, y que para explicar 90.8 % de la variación entre las accesiones se requiere de los cuatro primeros componentes principales. Es decir, las variables relevantes en la descripción morfológica de las accesiones de pitahaya están distribuidas en al menos cuatro componentes.

En el Cuadro 7 se detalla las variables que forman cada componente principal. El CP1 (componente principal 1) individualmente explica 38.17 % de la variación total de las accesiones, y está representado por las variables porcentaje de pérdida de peso y las densidades estomáticas tanto de fruto como de brácteas. El CP2 explica 25.47 % de la variación total y se conforma por las variables de diámetro polar, la relación de los diámetros ecuatorial y polar, y el largo de brácteas. El CP3 se compone de las variables de número de brácteas en fruto, la medida de la base de brácteas y la relación del largo y la base de brácteas, que aportan 15.53 % de la variación total de los genotipos estudiados. El CP4 explica 11.67 % de la variación total y se forma de las variables de peso total y diámetro ecuatorial.

Cuadro 7. Variación explicada por los cuatro componentes principales derivados de 11 variables morfológicas de frutos de 11 genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*)

Componentes principales				
	1	2	3	4
Autovalor	4.199	2.802	1.708	1.284
Proporción de la variación explicada (%)	38.17	25.47	15.53	11.67
Proporción de la variación acumulada (%)	38.17	63.65	79.18	90.85
Puntuación por variable en componentes				
PT	-0.16	0.16	0.10	0.53
PP	0.37	-0.06	0.09	-0.14
DE	0.01	-0.11	-0.11	0.45
DP	-0.09	0.36	0.04	0.08
DE/DP	0.07	-0.34	-0.07	0.19
NB	-0.09	-0.11	-0.47	0.07
BB	-0.08	0.05	0.42	0.09
LB	0.01	0.32	0.16	0.16
B/L B	-0.04	-0.16	0.21	-0.03
DestF	0.31	-0.03	-0.01	-0.03
DestB	0.34	-0.10	-0.10	-0.05

PT, peso total; PP, pérdida de peso; DE, diámetro ecuatorial; DP, diámetro polar; DE/DP, índice ecuatorial-polar; NB, número de brácteas; BB, base de bráctea; LB, largo de bráctea; B/L B, índice base/largo de bráctea; DestF, densidad estomática de fruto; DestB, densidad estomática en

brácteas. Las variables con mayor influencia sobre cada componente principal en columnas son resaltadas en negritas.

La dispersión espacial de los genotipos realizada con las variables que integran los tres primeros componentes principales se muestra en la Figura 4. De las 11 variables empleadas para el análisis, solamente 9 forman parte de los tres primeros componentes principales que explican 79.18 % de la variación entre las accesiones.

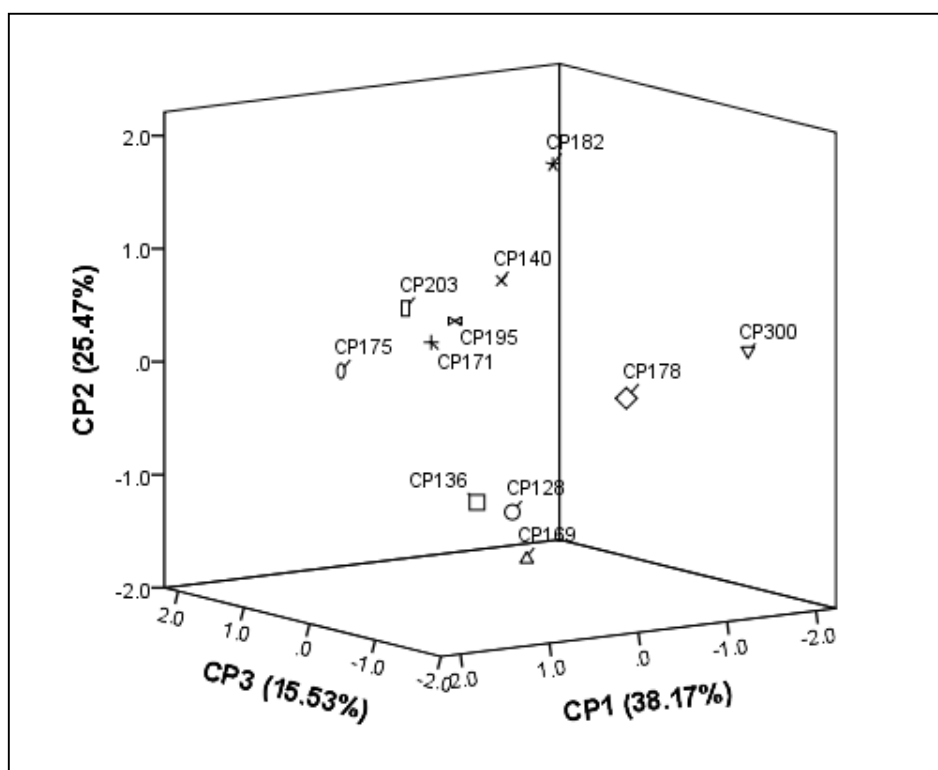


Figura 4. Gráfico de dispersión de los genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) en función de los tres primeros componentes principales derivado de variables morfológicas de fruto.

El componente principal 1 (CP1) representa la variación dada por la correlación del porcentaje de pérdida de peso y la densidad estomática en brácteas y fruto, donde los frutos de los genotipos CP-175, CP-203, CP-171, CP-195 y CP-169 presentaron una

mayor densidad estomática y de 8 a 10% de pérdida de peso durante 10 días de almacenamiento.

El CP2 ordena los genotipos según sus dimensiones. De acuerdo con este eje, las accesiones ubicadas en positivo: CP-182, CP-140, CP-203, CP-195, CP-171, CP-300, CP-175 y CP-178 representan a los frutos de tipo ovalado y alargados, concordando con la comparación de medias de Tukey antes realizada. Por lo tanto, al alejarse de los valores positivos del eje se reduce el diámetro polar, así como el largo de las brácteas en fruto. Así, en negativo se encuentran los genotipos clasificados como redondos: CP-169, CP-136 y CP-128. En este componente se muestran, de igual manera la forma de las brácteas como otra variable significativa correlacionada con la forma del fruto, de tal forma que un valor cercano a la unidad y superior se refiere a brácteas pequeñas y trianguladas; y un valor bajo son alargadas y de base reducida, en forma de espada.

El CP3 integra a los genotipos en función del número de brácteas y la medida de base de estas, de tal manera que el fruto entre más brácteas posea menor será la base de sus brácteas. En este caso, genotipos como CP-300, CP-178, CP-169, CP-195 y CP-171 tienen mayor número de brácteas, pero bases reducidas; lo contrario ocurre con los genotipos CP-175, CP-300, CP-178, CP-171, CP-140 y CP-136 los cuales poseen menos brácteas por fruto, pero la base de las pocas que tienen es mayor.

Variables bioquímicas

Las variables bioquímicas evaluadas en los 11 genotipos se muestran en el Cuadro 8. Los genotipos con valores más altos de acidez titulable (AT) en porcentaje de ácido málico fueron CP-169 y CP-128 con 0.415 y 0.400, respectivamente. Los genotipos CP-

136, CP-203 y CP-140 fueron estadísticamente iguales en los valores más bajos de ácido málico con 0.215, 0.228 y 0.229, respectivamente. Otras investigaciones mostraron diferentes resultados de AT en fruto de pitahaya: Centurión *et al.*, (2008) obtuvieron 0.4% en frutos de *H. undatus*; Osuna-Enciso *et al.* (2011) obtuvieron valores de 0.92, 0.76 0.63% de ácido málico en frutos cosechados en madurez inicial, media y completa, respectivamente; Chik *et al.*, (2011) en *H. polyrhizus* observaron 0.19% de ácido málico, en *H. undatus* 0.26% y en pitahaya amarilla (*S. Megalanthus*) 0.18%; Vásquez-Castillo *et al.* (2016) estudiaron dos variedades de pitahaya amarilla en las que obtuvieron valores entre 0.08 y 0.12% de ácido málico y Soares-Magalhaes *et al.* (2019) observaron un cambio de AT de 1.6 a 0.25% en *H. undatus*. En este sentido, la acumulación de AT antes de cosechar coincide con el cambio de coloración de la cáscara (Osuna-Enciso *et al.*, 2011) y este parámetro disminuye conforme el fruto madura (Esquivel y Araya, 2007), pues los ácidos orgánicos son utilizados como sustrato para la respiración y son transformados en azúcares, lo que conlleva a un aumento paulatino de sólidos solubles totales (SST) (Chitarra y Chitarra, 2005). Según Soares-Magalhaes *et al.* (2019) porcentajes menores de 1 % de AT permite percibir sabores dulces en el fruto, sin embargo, si este parámetro baja demasiado no se llega a detectar tal dulzor (Arévalo-Galarza y Ortiz-Hernández, 2004), por lo tanto, por si solo este parámetro no es un buen indicador de calidad.

Al respecto de los sólidos solubles totales (SST), el CP-178 fue el genotipo estadísticamente mayor con 15.9 °Brix, seguido del CP-300 con 15 y, el CP-136 resultó con el menor valor con 12.5 °Brix. Otros estudios como Centurión *et al.*, (2008) obtuvieron 12.6 de SST; Osuna-Enciso *et al.* (2011) observaron 13.6, 12.4 y 12.2 en frutos

cosechados a madurez inicial, media y completa, respectivamente; Chik *et al.* (2011) reportan 8.2 para *H. polyrhizus*, 8.7 en *H. undatus* y 15 para *S. Megalanthus*; Vásquez-Castillo *et al.* (2016) mencionaron valores de hasta 20.1 y 17.9 de SST en dos variedades de pitahaya amarilla, así como Cáliz de Dios (2005) que menciona a la subespecie de fruto amarillo *H. undatus* subsp. *Luteocarpus* con altos contenidos de SST entre 11.5 y 16.4; y Soares-Magalhaes *et al.* (2019) observaron que a los 38 días después de antesis los frutos tuvieron 15.44 de SST, sin embargo, la mejor aceptación por parte del consumidor la obtuvieron cuando los frutos presentaron 12 °Brix a los 32 días después de antesis. Además del metabolismo de los ácidos orgánicos en la respiración, también la pérdida de agua en el fruto conforme avanza los días en postcosecha ocasiona el aumento de SST (Arévalo-Galarza y Ortiz-Hernández, 2004).

La relación SST/AT resulta ser un buen indicador de calidad que muestra el equilibrio de sabor en el fruto de pitahaya. Nerd *et al.* (1999) y Centurión *et al.* (2008) coinciden en que una relación SST/AT menor a 40 otorga un buen equilibrio de dulzor y acidez al fruto, por lo que en este punto tiene la mejor aceptación por parte de los consumidores. En tanto que valores altos de esta relación no son buenos indicadores de calidad (Osuna-Enciso *et al.*, 2011).

La relación SST/AT de los genotipos estudiados en este trabajo que tuvieron mayor valor y fueron estadísticamente iguales fueron el CP-300, CP-136, CP-203, CP-140 y CP-195, con 61.14, 59.52, 57.73, 57.68 y 53.95, respectivamente. El CP-175 resultó con el índice SST/AT más bajo con 33.04, luego CP-169 y CP-128 siendo estos últimos estadísticamente iguales. En el presente estudio fueron dos genotipos de pulpa rosa y uno de pulpa blanca que resultaron con los valores entre 33 y 36 y cuya característica

de sabor fue equilibrado entre la acidez y el dulzor, este último bien definido. Un punto medio de dulzor se detectó en genotipos cuyo rango de índice SST/AT fue de 50 a 54, en uno de pulpa blanca (CP-171) y uno de pulpa rosa intenso (CP-178), además de dos genotipos amarillos (CP-182 y CP-195) con sabor agridulce. Por otra parte, los valores más altos del índice entre 57 y 61 fueron frutos que, si bien no fueron insípidos, el dulzor era menos perceptible que en los frutos del punto medio y correspondieron a frutos de pulpa rosa (CP-300), de pulpa blanca (CP-140 y CP-136) y uno amarillo (CP-203). En otras investigaciones se obtuvieron índice SST/AT con valores de 33.5 (Centurión *et al.*, 2008); 13, 22 y 60 para frutos cosechados a madurez inicial, media y completa, respectivamente (Osuna-Enciso *et al.*, 2011); y 42.9 en *H. polyrhizus*, 33.1 en *H. undatus* y 89.6 en *S. Megalanthus* (Chik *et al.*, 2011).

En el contenido de vitamina C, betacianinas, betaxantinas, fenoles totales y capacidad antioxidante, el genotipo que sobresalió con valores más altos y estadísticamente significativos fue el CP-178, con valores de 102.64 $\mu\text{g ml}^{-1}$, 19.629 $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ pulpa, 6.154 $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ pulpa, 71.56 mg L^{-1} , respectivamente, y 52.94% de capacidad de barrido de radical. En general, los cuatro genotipos de pulpa rosa CP-128, CP-169, CP-300 y CP-178 presentaron mayores valores que los genotipos de fruta amarilla y dos de pulpa blanca en dichas variables. Solamente para el contenido de fenoles totales el CP-128 fue estadísticamente igual que CP-136 y CP-171, estos últimos dos de pulpa blanca.

Los genotipos con menor contenido de vitamina C sin diferencia significativa fueron tres de pulpa blanca CP-175, CP-140 y CP-171, y una amarilla CP-203 en un rango de concentración de 24.62 a 26.58 $\mu\text{g ml}^{-1}$. Otros autores como Centurión *et al.* (2008) obtuvieron una concentración promedio de vitamina C de 14.7 $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ de pulpa en el

día 20 después de antesis y esta disminuyó hasta 9.6 mg 100 g⁻¹ pulpa en el día 31 después de antesis en frutos de *H. undatus*. Así mismo, Osuna-Enciso *et al.* (2011) observaron esta misma tendencia de disminución de vitamina C al estudiar frutos en madurez inicial, media y completa, donde obtuvieron valores de 9.31, 8.48 y 7.93 mg 100 g⁻¹ de pulpa, respectivamente. También Arévalo-Galarza y Ortiz-Hernández (2004) obtuvieron una concentración inicial de vitamina C de 24 mg 100 g⁻¹ de pulpa en frutos de *H. undatus* y después de 8 días de almacenamiento disminuyó hasta 14.95 mg 100 g⁻¹ de pulpa. Se explicó anteriormente que el aumento observado de los SST se debió a la toma de ácidos orgánicos como sustrato durante la respiración, lo que explica entonces la disminución de la vitamina C (ácido ascórbico) durante el proceso de maduración y el incremento de la respiración del fruto.

Por otra parte, para el contenido de pigmentos se observó que tanto betacianinas como betaxantinas presentaban bajos valores sin diferencia significativa en los genotipos CP-171, CP-136, CP-140, CP-195, CP-182, CP-175 y CP-203, donde para el primer grupo de pigmentos se obtuvieron valores oscilaron entre los 0.033 y 0.285 mg 100 g⁻¹ pulpa. Para el segundo grupo de pigmentos el contenido estuvo en un rango de 0 a 0.229 mg 100 g⁻¹ pulpa. En los genotipos de pulpa rosa las betacianinas destacaron con valores totales en un rango de 6.61 a 19.62 mg 100 g⁻¹ pulpa, donde CP-169 y CP-128 fueron estadísticamente iguales. Muchos autores han estudiado los pigmentos de la pitahaya, tanto en pulpa como en cáscara, como Stintzing *et al.* (2002) al estudiar jugo de la fruta de pitahaya y extractos acuosos de la pulpa encontraron 8 tipos diferentes de betalainas, entre las que destacaron con mayores concentraciones la betanina, betanidina, isobetanidina, filocactina e isofilocactina, y no detectaron betaxantinas. Resultados

similares obtuvieron Esquivel *et al.* (2007b) que obtuvieron concentraciones de betalainas totales entre 43.2 y 75.1 mg 100 ml⁻¹ en *H. undatus* y *H. polyrhizus*. También Esquivel *et al.* (2007) encontraron concentraciones totales de betalainas desde 474 a 717.1 mg l⁻¹ y de las cuales la betanina, isobetanina, betanidina, filocactina, isofilocactina, indicaxantina e hylocerenina fueron las predominantes en extractos acuosos de pitahaya estudiados. Por su parte, Tenore *et al.* (2012) compararon las concentraciones de betalainas presentes en pulpa y cáscara de *H. polyrhizus* al analizar extractos etanólicos de sus respectivas partes, y encontraron la presencia de betanidinas e isobetanidinas en mayores proporciones, tanto en cáscara como en pulpa, sin embargo, en cáscara observaron valores de los pigmentos casi 10 veces más que en la pulpa. También en cáscara, Mello *et al.* (2015) y Faridah *et al.* (2015) encontraron betacianinas en *H. spp.* en concentraciones de 101 mg 100 g de tejido, y *H. polyrhizus* 73 mg 100 g de tejido, respectivamente.

Por otra parte, el CP-300 resultó el segundo genotipo con valores más altos y significativos de fenoles totales con 49.56 mg L⁻¹, y con capacidad antioxidante de 36.52 % de barrido de radical. Para la primera variable, los valores más bajos se obtuvieron en el CP-203 con 24.89 mg L⁻¹, y en la variable de capacidad antioxidante el genotipo con menor porcentaje de barrido de radical fue el CP-195 con 6.29 % RSC, ambos genotipos de cáscara amarilla. Los fenoles totales en pitahaya están compuestos mayormente por fracciones de flavonoides y ácidos fenólicos como el ácido gálico, y el ácido betalámico Esquivel *et al.* (2007b) y este último corresponde al principal precursor de las betalainas. Al existir una amplia gama de tonalidades que resultan de la mezcla de betacianinas y betaxantinas Soares-Magalhaes *et al.* (2019) se correlaciona el contenido de pigmentos,

no solamente con el color de la fruta sino también con la capacidad antioxidante (Esquivel *et al.*, 2007b; Repo de Carrasco y Encina-Zelada, 2008). Por lo tanto, este efecto antioxidante se debe la acción sinérgica de los distintos compuestos bioactivos del fruto de pitahaya como los fenoles totales, los pigmentos y la vitamina C, principalmente. Diversos autores concuerdan con lo anterior, como Esquivel *et al.* (2007b) que observaron concentraciones de fenoles totales que oscilaron entre 9.2 y 13.3 mg 100 ml⁻¹, así como la capacidad antioxidante medida de entre 24.5 a 36.1 mg 100 ml⁻¹ TEAC (Trolox Equivalent Antioxidant Capacity), y cuya variable tuvo una alta correlación tanto con el contenido de fenoles totales como con el de betalainas. Lo anterior, concuerda, así mismo, con los resultados obtenidos en este estudio, en el Cuadro 9 se destaca la alta correlación entre las variables de pigmentos, fenoles totales, vitamina C y la capacidad antioxidante, además de la correlación de betacianinas y betaxantinas con los fenoles totales, por lo que supone, en estos últimos, la presencia de fracciones de compuestos como el ácido betalámico como precursor de dichos pigmentos.

Cuadro 8. Variables bioquímicas de frutos de pitahaya (*Hylocereus spp.*)

Genotipo	AT (%)	SST	SST/AT	VitC	BC	BX	FT	CA (%)
CP203	0.228 d	13.0 ef	57.73 a	25.93 e	0.285 d	0.229 d	24.89 d	8.92 e
CP182	0.273 cd	14.1 cd	51.95 ab	33.53 d	0.177 d	0.0 d	30.00 cd	8.55 e
CP195	0.259 cd	14.0 cd	53.95 a	33.61 d	0.136 d	0.042 d	27.78 cd	6.29 f
CP175	0.388 ab	12.8 ef	33.04 c	24.62 e	0.207 d	0.713 c	28.00 cd	8.77 e
CP171	0.259 cd	13.4 de	52.61 ab	26.58 e	0.033 d	0.035 d	34.89 bcd	8.86 e
CP140	0.229 d	13.1 ef	57.68 a	25.93 e	0.057 d	0.048 d	30.00 cd	8.40 e
CP136	0.215 d	12.5 f	59.52 a	32.22 d	0.044 d	0.047 d	36.00 bcd	8.18 e
CP128	0.400 ab	14.5 bc	36.44 bc	44.57 c	6.618 c	2.403 b	34.67 bcd	23.23 c
CP300	0.247 cd	15.0 b	61.14 a	63.96 b	15.809 b	5.792 a	49.56 b	36.52 b
CP169	0.415 a	14.6 bc	35.52 bc	43.18 c	7.296 c	2.505 b	44.44 bc	16.08 d
CP178	0.318 bc	15.9 a	50.07 abc	102.64 a	19.629 a	6.154 a	71.56 a	52.94 a

AT, Acidez titulable (% ácido málico); SST, sólidos solubles totales (°Brix); SST/AT, relación sólidos solubles totales y acidez titulable; VITC, vitamina C ($\mu\text{g ml}^{-1}$); BC, betacianinas ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ pulpa); BX, betaxantinas ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ pulpa); FT, fenoles totales (mg L^{-1} ácido gálico); CA, capacidad antioxidante (% de barrido de radical (RSC)). Tukey 0.05.

Cuadro 9. Valores de correlación de Pearson para variables de capacidad antioxidante, fenoles totales, vitamina C y pigmentos. Nivel de significancia de 0.05 bilateral.

	Capacidad Antioxidante	Fenoles Totales
Betacianinas	0.855	0.953
Betaxantinas	0.873	0.951
Fenoles Totales	0.783	1
Vitamina C	0.848	0.954

Análisis de componentes principales para variables bioquímicas

Se utilizaron 8 variables para explicar 94.02 % de la variación total entre genotipos, las cuales se ordenaron en dos componentes principales. El Cuadro 10 presenta las variables que forman cada componente principal.

El CP1 individualmente explica 69.81 % de la variación total, y está representado por 6 de las 8 variables bioquímicas utilizadas en el estudio: Sólidos solubles totales (SST), Vitamina C (VitC), pigmentos en pulpa betacianinas (BC) y betaxantinas (BX), fenoles totales (FT) y capacidad antioxidante (CA). El CP2 explica 24.2 % de la variación total y se conforma por las variables acidez titulable (AT) y relación sólidos solubles totales y acidez titulable (SST/AT).

Cuadro 10. Variación explicada por los dos componentes principales derivados de 8 variables bioquímicas de frutos de 11 genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*).

Componentes principales		
	1	2
Autovalor	5.585	1.937
Proporción de la variación explicada (%)	69.81	24.2
Proporción de la variación acumulada (%)	69.81	94.02
Puntuación de variables en componentes		
AT	-0.012	0.492
SST	0.156	0.058
SST/AT	0.055	-0.510
VitC	0.181	-0.042
BC	0.181	-0.013
BX	0.176	0.004
FT	0.174	-0.032
CA	0.177	-0.040

AT, acidez titulable; SST, Sólidos solubles totales; SST/AT, relación sólidos solubles totales y acidez titulable; VitC, Vitamina C; BC, betacianinas; BX, betaxantinas; FT, fenoles totales; CA, capacidad antioxidante. Las variables con mayor influencia sobre cada componente principal en columnas son resaltadas en negritas.

La dispersión espacial de los genotipos realizada con las variables que integran los dos componentes principales se muestra en la figura 5, donde el CP1 integra a las accesiones de acuerdo con la influencia de la correlación existente entre el contenido de pigmentos

con otras variables como vitamina C y fenoles totales, capacidad antioxidante y los sólidos solubles totales y tal correlación explica casi 70 % de la variación total. De modo que, las accesiones ubicadas al extremo positivo de este eje poseen mayor contenido en las variables antes mencionadas: CP-178, CP-300, CP-169 y CP-128. Por el lado negativo del eje, se encuentran las accesiones cuyos frutos presentan una reducción significativa de betacianinas y betaxantinas en pulpa: CP-195, CP-182, CP-136, CP-203, CP-171, CP-140 y CP-175.

El CP2 se refiere al eje de madurez de fruto de acuerdo con la relación entre sólidos solubles totales y la acidez titulable. Es así como se muestran a los genotipos con mayor índice SST/AT en el lado negativo del eje, como son CP-136, CP-300 y CP-140. Luego, con menores valores del índice pero mayor porcentaje de ácido málico (AT) se encuentran CP-169, CP-175 y CP-128.

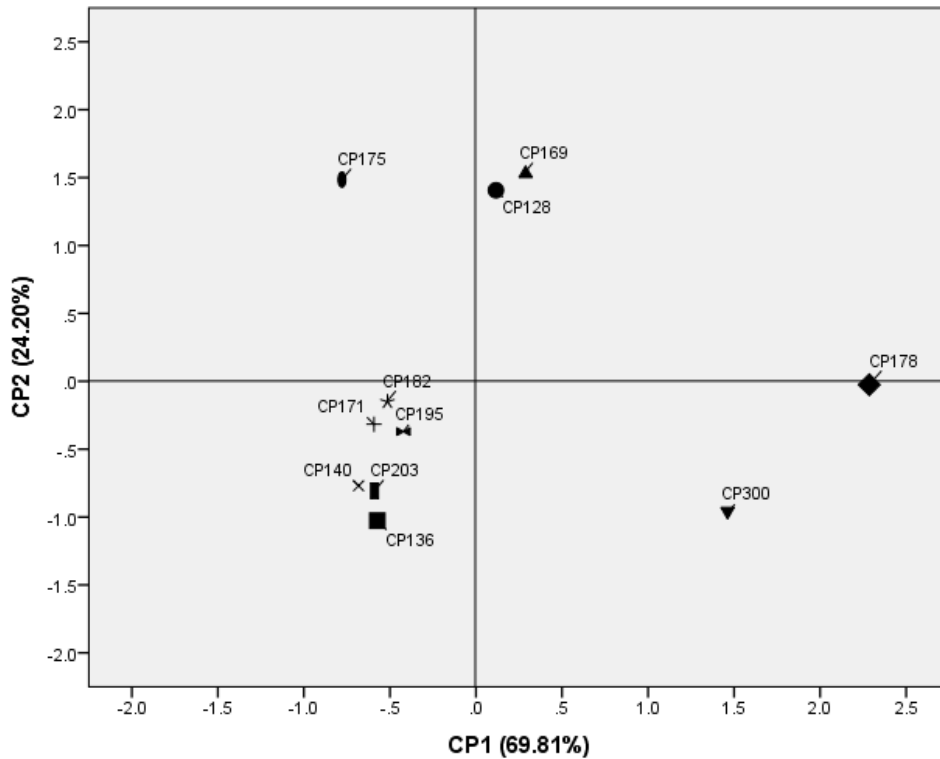


Figura 5. Gráfico de dispersión de los genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) en función de dos componentes principales derivado de variables bioquímicas de fruto.

Características de color en pulpa y cáscara de pitahaya (*Hylocereus spp.*)

El color de cáscara y pulpa fue determinado por medio de la escala CIE-LCh, donde las variables de luminosidad, chroma o saturación y hue o tono, resultaron de la siguiente manera (Cuadro 11): Para color de cáscara los genotipos de cáscara amarilla CP-203, CP-195 y CP-182 fueron los de mayor significancia estadística en luminosidad (Lc) y tono en hue (Hc), con un rango de 79 a 83 en la primera variable y de 86 a 91 en la segunda. El CP-178, CP-169 y CP-136 obtuvieron los valores mayores en chroma (Cc), correspondieron a cáscaras con saturación media y tono variable en la escala del color rosa. Los valores más bajos de Lc los obtuvieron el CP-178 (51.61) y CP-175 (52.43),

con cáscara más oscura en rosa que el resto de los genotipos. Así mismo el matiz (Hc) menor se observó en el CP-136 con 2.63, es decir, un tono rosa con saturación y luminosidad media. En lo que se refiere al color en pulpa, los genotipos CP-175, CP-203 y CP-195 obtuvieron los mayores valores, sin diferencia significativa, entre 82 y 85 de Lp, que correspondieron a pulpas blancas con menor número de semillas negras concentradas en un mismo sitio. Por el contrario, fueron estadísticamente iguales los valores más bajos de Lp de los genotipos CP-300, CP-178 y CP-128 que oscilaron entre 23 y 31 que pertenecen a las pulpas rosas más intensas. La saturación en pulpa (Cp) resultó mayor en el CP-169 con 40.45. Los genotipos CP-175, CP-140, CP-136, CP-203, CP-182 y CP-195 fueron estadísticamente iguales con valores más bajos de Cp entre 9.38 y 10.23. El tono en pulpa (Hp) fue mayor en CP-169 y CP-128 con 352.17 y 352.07, respectivamente, genotipos de pulpa en tonos rojos. Por otro lado, los valores más bajos y estadísticamente iguales fueron de los genotipos CP-300 y CP-178 con 5.36 y 13.43, respectivamente, éste último en tono guinda.

Cuadro 11. Variables de color en escala CIE-LCh de 11 genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*).

	Lc	Cc	Hc	Lp	Cp	Hp
CP175	52.43 f	47.66 abc	9.28 bc	84.15 a	10.23 d	116.85b
CP171	53.38 ef	51.4 ab	6.15 cd	80.61 abc	9.38 d	112.43 c
CP140	53.97 def	51.21 ab	8.99 c	73.31 bc	10.12 d	97.56 d
CP136	59.28 cd	52.89 a	2.63 d	71.7 c	8.82 d	110.96 c
CP203	79.22 a	41.91 cd	90.05 a	85.08 a	9.5 d	110.99 c
CP195	82.7 a	38.27 d	88.42 a	82.71 a	9.58 d	111.37 c
CP182	82.17 a	39.72 d	86.94 a	80.8 ab	9.42 d	111.47 c
CP178	51.61 f	53.63 a	15.01 b	27.31 d	36.68 c	13.43 e
CP300	66.63 b	51.95 ab	9.79 bc	23.74 d	38.33 bc	5.36 e
CP128	58.3 cde	44.8 bcd	9.29 bc	30.94 d	40.2 ab	352.07 a
CP169	62.6 bc	52.93 a	10.69 bc	27.1 d	40.45 a	352.17 a

Lc, Luminosidad en cáscara; Cc, chroma en cáscara; Hc, Hue en cáscara; Lp, luminosidad en pulpa; Cp, chroma en pulpa; Hp, Hue en pulpa.

Componentes principales para variables de color

Se utilizaron 6 variables de color derivados del sistema LCH (Luminosidad, Chroma y hue), de los cuales fueron 3 para cáscara y 3 para pulpa. Se requirieron dos componentes principales para explicar 83.39 % de la variación total. El Cuadro 12 presenta las variables que forman cada componente principal.

El CP1 individualmente explica 60.01 % de la variación total, y está representado por las variables de color de cáscara: Luminosidad (Lcas), Chroma o saturación (Ccas) y grados

Hue o matiz (Hcas). El CP2 explica 23.7 % de la variación total y se conforma por las variables de color de pulpa: Luminosidad (Lp), Chroma o saturación (Cp) y grados Hue o matiz (Hp).

Cuadro 12. Variación explicada por los dos componentes principales derivados de variables de color de cáscara y pulpa de frutos de 11 genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*).

Componentes principales		
	1	2
Autovalor	3.6	1.4
Proporción de la variación explicada (%)	60.01	23.37
Proporción de la variación acumulada (%)	60.01	83.39
Puntuación de variables en componentes		
Lcas	0.397	0.154
Hcas	0.364	0.077
Ccas	0.331	0.038
Lp	-0.050	-0.439
Hp	0.115	0.334
Cp	0.089	0.482

Lcas, Luminosidad de cáscara; Ccas, Chroma de cáscara; Hcas, °Hue de cáscara; Lp, luminosidad de pulpa; Cp, chroma de pulpa; Hp, °Hue de pulpa. *Las variables con mayor influencia sobre cada componente principal en columnas son resaltadas en negritas.*

La dispersión espacial de los genotipos realizada con las variables que integran los dos componentes principales se muestra en la figura 6, donde el CP1 muestra a las

accesiones agrupadas de acuerdo con el color de cáscara. Tal es el caso de CP-195, CP-203 y CP-182 que representan el grupo con mayores valores en las variables de color del sistema LCH de entre todos los genotipos. Este grupo se caracteriza por tener cáscara amarilla con leve variación en la combinación de las tres variables evaluadas. Sobre el mismo eje, se pueden apreciar dispersas las accesiones que se caracterizan por tener valores más bajos de LCH y en distintas combinaciones para dar como resultado una amplia gama de colores rosados. Tales genotipos son CP-169, CP-300, CP-128, CP-178, CP-136, CP-140, CP-171 y CP-175 (testigo).

El CP2 integra a los genotipos de acuerdo con el color de pulpa. Es así como en este eje los genotipos se encuentran distribuidos, de sentido negativo a positivo, los frutos de pulpa blanca y los de pulpa rosa. Las accesiones CP-178, CP-300, CP-128 y CP-169 poseen valores altos de Chroma y bajos de Luminosidad. En cuanto a los grados Hue, los valores son variables entre estos genotipos para resultar en distintos tonos de rosa.

Así mismo, se distinguen tres grupos de genotipos según el color de cáscara y de pulpa en conjunto. El primero de los grupos integra las accesiones cuyos frutos son de cáscara rosa y pulpa rosa: CP-178, CP-128, CP-169 y CP-300. El segundo grupo está conformado por CP-175, CP-171, CP-140 y CP-136 cuyos frutos poseen cáscara rosa y pulpa blanca. El tercer grupo consta de los genotipos CP-182, CP-195 y CP-203 con cáscara amarilla y pulpa blanca.

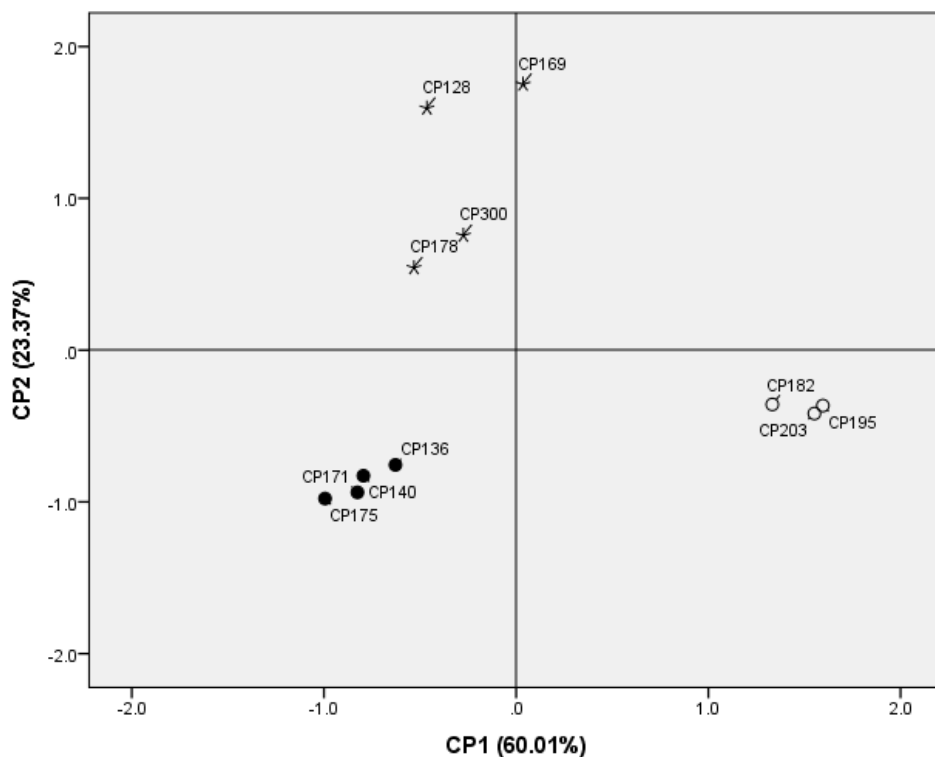


Figura 6. Gráfico de dispersión de los genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) en función de dos componentes principales derivado de variables de color de cáscara y de pulpa.

Componentes principales para variables bioquímicas y de color

Se conjuntaron las 6 variables de color con las 8 bioquímicas en un análisis de componentes principales. En el Cuadro 13 se observan los componentes principales derivados, donde CP1 es responsable de 54.73 % de la variación total e integra 7 variables: SST, VitC, BC, BX, FT, CA y Lp. El CP2 explica por sí mismo 24.14 % de la variación total con las variables de LCH de cáscara: Lcas, Ccas y Hcas. En conjunto ambos componentes logran explicar 78.87 % de la variación. El CP3 integra a las variables de AT, SST/AT, Hp y Cp, y explica 13.67 % de la variación total.

Cuadro 13. Variación explicada por los tres componentes principales derivados de variables bioquímicas en conjunto con variables de color de cáscara y pulpa de frutos de 11 genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*).

	Componentes principales		
	1	2	3
Autovalor	7.662	3.379	1.914
Proporción de la variación explicada (%)	54.73	24.14	13.67
Proporción de la variación acumulada (%)	54.73	78.87	92.54
Puntuación por variable en componentes			
AT	0.014	0.041	0.317
SST	0.158	0.143	0.073
SST/AT	0.024	-0.021	-0.318
VitC	0.147	0.020	-0.063
BC	0.145	0.002	-0.041
BX	0.140	-0.008	-0.035
FT	0.124	-0.059	-0.086
CA	0.151	0.046	-0.044
Lcas	0.051	0.371	0.085
Hcas	0.044	0.364	0.077
Ccas	0.054	0.317	-0.017
Lp	-0.115	0.005	-0.080
Hp	-0.034	0.084	0.342
Cp	0.115	0.040	0.141

AT, acidez titulable; SST, Sólidos solubles totales; SST/AT, relación sólidos solubles totales y acidez titulable; VitC, Vitamina C; BC, betacianinas; BX, betaxantinas; FT, fenoles totales; CA, capacidad antioxidante; Lcas, Luminosidad de cáscara; Ccas, Chroma de cáscara; Hcas, °Hue de cáscara; Lp, Luminosidad de pulpa; Cp, Chroma de pulpa; Hp, °Hue de pulpa. *Las variables con mayor influencia sobre cada componente principal en columnas son resaltadas en negritas.*

En la Figura 7 se detalla la dispersión de las accesiones en función de los dos primeros componentes principales, cuya variación explicada es de 78.87 % del total. En el eje de CP1 se observa una dispersión muy similar a la obtenida en el análisis de componentes principales únicamente de las variables bioquímicas, por lo que, al agregar las variables de color, Lp en este eje resulta inverso a las demás variables, de tal manera que los genotipos con contenidos más altos en SST, CA, VitC, FT y pigmentos BC y BX poseen una menor luminosidad en pulpa. Se agrupan aquí entonces, CP-178, CP-300, CP-169 y CP-128. Luego se resaltan los genotipos de cáscara amarilla y pulpa blanca CP-195, CP-182, CP-203, y finalmente los genotipos de cáscara rosa y pulpa blanca CP-136, CP-171, CP-140 y el testigo CP-175.

El CP2 ordena las accesiones por color de cáscara. Así, en la parte positiva del eje se encuentran los frutos de cáscara amarilla y pulpa blanca por poseer mayores valores del sistema LCH en cáscara, seguidos de los genotipos de cáscara rosa en sus distintas combinaciones de LCH.

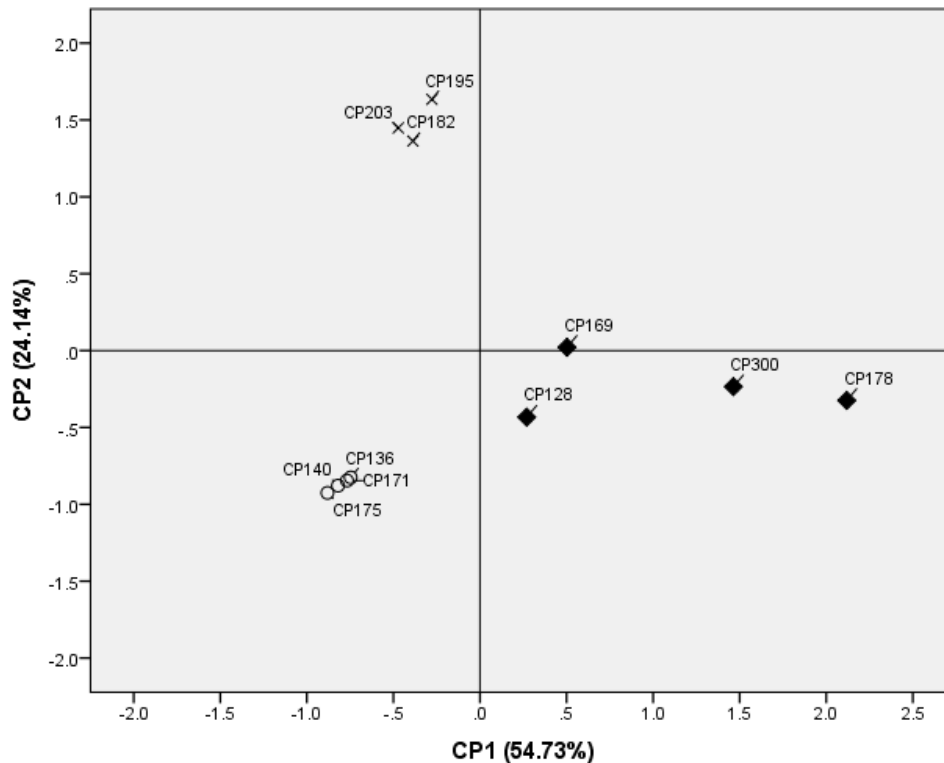


Figura 7. Gráfico de dispersión de los genotipos de pitahaya (*Hylocereus spp.*) en función de dos componentes principales derivado de variables bioquímicas y de color de cáscara y de pulpa.

1.6. CONCLUSIONES

Los 11 genotipos estudiados presentan atributos que brindan un alto potencial para competir en el mercado. La gama de variedades logra reunir tamaño con buen llenado de pulpa, en lo general. Así mismo, tanto el equilibrio como las desviaciones mínimas que presentan entre dulzor y acidez pueden cubrir los distintos gustos de los consumidores, con frutos dulces, de dulzor intermedio y/o agridulces que pueden tener, al final, un destino diferente entre el consumo en fresco y el procesado.

Sin duda, en lo particular, de los frutos de cáscara rosa y pulpa blanca destacan el CP-175 y CP-171, el primero por sus atributos de apariencia, frutos de tamaño grande, buen llenado de pulpa y dulzor bien definido, pero con la desventaja de una vida de anaquel

más corta por rápida pérdida de peso en ambientes no controlados; el segundo genotipo destaca en frutos de tamaño grande, buen llenado de pulpa y dulzor intermedio, sin embargo, presenta el mismo problema de vida de anaquel que el anterior.

Por otra parte, de los genotipos de frutos amarillos destaca el CP-182 con tamaño mediano de frutos alargados, una mejor vida de anaquel, buen llenado de fruta y de sabor fresco agridulce, su desventaja es la apariencia pues las brácteas representan un atractivo visual importante en esta fruta y el genotipo presenta la menor cantidad de estas. Así también, el CP-203 muestra una ventaja al ser el genotipo con mayor llenado de pulpa y poseer buen peso y apariencia externa, además de ser agridulce al paladar, sin embargo, la vida de anaquel se reduce más fácilmente que en los demás genotipos.

Finalmente los frutos con pulpa en tonalidades de rosa destacan los de los genotipos CP-178 y CP-300, el primero con atributos importantes para la preferencia del mercado como su peso, buen llenado de pulpa, bajo porcentaje de pérdida de peso en su vida de anaquel en ambientes no controlados a temperatura ambiente, un dulzor intermedio y con uno de los aportes más buscados en el mercado: fuente importante de vitamina C, pigmentos, alto contenido de fenoles totales y su alta capacidad antioxidante por encima de 50 %. EL CP-300 destaca en su mejor vida de anaquel por encima de los demás genotipos estudiados, buen llenado de fruta y un aporte importante de pigmentos, vitamina C, fenoles totales y alta capacidad antioxidante, la desventaja más marcada reside en su sabor, que, si bien no es un fruto desabrido, no se distingue mucho el dulzor por su bajo contenido de acidez.

La gama de variedades que se han desarrollado en el Colegio de Postgraduados logra reunir tamaño con buen llenado de pulpa. Tanto el equilibrio como las desviaciones mínimas que presentan entre dulzor y acidez pueden cubrir los distintos gustos de los consumidores, con frutos dulces, semidulces y/o agridulces, y finalmente poseen metabolitos con alta capacidad antioxidante benéficos para la salud.

1.7.LITERATURA CITADA

- Arévalo G. M. L & Ortíz H. Y. D. (2004). Comportamiento postcosecha del fruto de la pitahaya (*Hylocereus undatus*). *Cactáceas y succulentas*. 49:85-90.
- Ariffin, A. A., Bakar, J., Tan, C. P., Rahman, R. A., Karim, R., & Loi, C. C. (2009). Essential fatty acids of pitaya (dragon fruit) seed oil. *Food Chemistry*, 114(2), 561-564.
- Association of Official Analytical Chemists International (AOAC) (1990). Official Methods of Analysis, 15th edn (edited by K. Helrich) Pp. 1028–1039. Arlington, VA: Association of Official Analytical Chemists Inc.
- Bravo-Hollis, H. (1978). Las cactáceas de México. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México xvi, Vol I. 743p.-illus., col. illus., keys. Sp Icones. Geog, 4.
- Cálix, D. D. H. 2005. A new subspecies of *Hylocereus undatus* (cactaceae) from Southeastern México. *Haseltonia* 11: 11-17.
- Castillo, M.R., Livera, M.M., Márquez, J.G. 2005. Caracterización morfológica y compatibilidad sexual de cinco genotipos de pitahaya (*Hylocereus undatus*). *Agrociencia* 39:183-194.
- Celli, G. B., & Brooks, M. S. L. (2017). Impact of extraction and processing conditions on betalains and comparison of properties with anthocyanins—A current review. *Food Research International*, 100, 501-509.
- Centurión Y. A. R., Pereira, S. S., Veloz, C. S., Sañudo, R. B., & Duch, E. S. (2008). Cambios físicos, químicos y sensoriales en frutos de pitahaya (*Hylocereus undatus*) durante su desarrollo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(1), 1-5.
- Centurión Y. A., Solís S. P., Silva E. M., Sañudo R. E., Saucedo C. V., Sauri E. D. (1999). Variación de las principales características de la pitahaya (*Hylocereus undatus*) durante su maduración postcosecha. *Horticultura Mexicana*. 17:12-19.
- Chik, C. T., Bachok, S., Baba, N., Abdullah, A., & Abdullah, N. (2011). Quality characteristics and acceptability of three types of pitaya fruits in a consumer acceptance test. *Journal of Tourism, Hospitality & Culinary Arts*, 3(1).
- Chitarra, M.I.F., Chitarra, A.B., 2005. Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio, 2. ed. UFLA, Ver. e amp. Lavras.
- Chowdhury, S., Hossain, M. M., Rahim, M. A., & Ferdous, T. (2020). Postharvest quality and shelf life of dragon fruit (*Hylocereus spp.*) as influenced by preharvest fruit bagging materials. *Journal of Agriculture, Food and Environment (JAFE)*. 1(4), 33-40.
- Codex Alimentarius. Codex Standard for Pitahayas, Codex Stan 237-2003, Amd.1-2005. Food and Agriculture Organization/World Health Organization Codex Alimentarius Commission.

- Corzo-Rios, L.J., Bautista-Ramírez, M.E., Gómez y Gómez, Y.M., & Torres-Bustillos, L.G. (2016). Frutas de cactáceas: Compuestos bioactivos y sus propiedades nutraceuticas. En M.E. Ramírez Ortiz (Ed.). Alimentos Funcionales de Hoy. Barcelona, España: OmniaScience. 35-66.
- Crane, J.; & Balerdi, C. (2005). The pitaya (*Hylocereus undatus* and other spp.) in Florida. Agricultural Sciences, University of Florida.
- Díaz, J. U. (2011). Biología y manejo postcosecha de Pitahaya roja y amarilla (*Hylocereus spp.*, y *Selenicereus spp.*). *La Calera*, 5(6), 44-49.
- Esquivel, P. (2004). Los frutos de las cactáceas y su potencial como materia prima. *Agronomía mesoamericana*, 15(2), 215-219.
- Esquivel, P., & Araya, Y. (2012). Características del fruto de la pitahaya (*Hylocereus sp.*) y su potencial de uso en la industria alimentaria. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3(1), 113-129.
- Esquivel, P., & Quesada A. Y. (2012). Características del fruto de la pitahaya (*Hylocereus sp.*) y su potencial de uso en la industria alimentaria. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3(1), 113-129.
- Esquivel, P., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2007b). Phenolic compound profiles and their corresponding antioxidant capacity of purple pitaya (*Hylocereus sp.*) genotypes. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 62(9-10), 636-644.
- Esquivel, P., Stintzing, F. C., & Reinhold, C. (2007). Comparison of morphological and chemical fruit traits from different pitaya genotypes (*Hylocereus sp.*) grown in Costa Rica. *Journal of Applied Botany and Food Quality*. 81(1):7-14
- Faridah, A., Holinesti, R., & Syukri, D. (2015). Betalains from Red Pitaya Peel (*Hylocereus polyrhizus*): Extraction, Spectrophotometric & HPLC-DAD Identification, Bioactivity & Toxicity Screening. *Pakistan Journal of Nutrition*, 14(12), 976-982.
- García-Cruz, L., Salinas-Moreno, Y., & Valle-Guadarrama, S. (2012). Betalainas, compuestos fenólicos y actividad antioxidante en pitaya de mayo (*Stenocereus griseus H.*). *Revista fitotecnia mexicana*, 35(SPE5), 01-05.
- González, V. H., Veliz Quinto, C. D., Jordán Molina, D., & Vásconez Cruz, J. S. (2009). Producción y Exportación de la Fruta Pitahaya hacia el mercado Europeo. Facultad de Economía y Negocios. Guayaquil. EC. pp. 1-8
- Hernández-Estrada. C. A (2012). Evaluación postcosecha de tres selecciones de pitahaya (*Hylocereus undatus*), en refrigeración y atmósferas controladas. Tesis Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. De México. 87 p.
- Hunt D.R. (2006). The new Cactus Lexicon. DH books, Milborne Port.
- Jagota, S. K., & Dani, H. M. (1982). A new colorimetric technique for the estimation of vitamin C using Folin phenol reagent. *Analytical biochemistry*, 127(1), 178-182.

- Jamilah, B., Shu, C. E., Kharidah, M., Dzulkifly, M. A., & Noranizan, A. (2011). Physico-chemical characteristics of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) peel. *International Food Research Journal*, 18:279-286.
- Juárez-Cruz, A. (2011). Caracterización química y estomática y crecimiento de tallos de *Acanthocereus tetragonus*, *A. subinermis* e *Hylocereus undatus*. Tesis de postgrado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. 44 p.
- Kim, H., Choi, H. K., Moon, J. Y., Kim, Y. S., Mosaddik, A., & Cho, S. K. (2011). Comparative antioxidant and antiproliferative activities of red and white pitayas and their correlation with flavonoid and polyphenol content. *Journal of food science*, 76(1).
- Kim, Y. K., Guo, Q., & Packer, L. (2002). Free radical scavenging activity of red ginseng aqueous extracts. *Toxicology*, 172(2), 149-156.
- Kumar, S. S., Manoj, P., Shetty, N. P., Prakash, M., & Giridhar, P. (2015). Characterization of major betalain pigments-gomphrenin, betanin and isobetanin from *Basella rubra* L. fruit and evaluation of efficacy as a natural colourant in product (ice cream) development. *Journal of food science and technology*, 52(8), 4994-5002.
- Ladaniya, M. S. (2008). Citrus Fruit. Biology, Technology and Evaluation. Academic Press, USA. 558 p.
- Le Bellec, F., Vaillant, F., & Imbert, E. (2006). Pitahaya (*Hylocereus spp.*): a new fruit crop, a market with a future. *Fruits*, 61(4), 237-250.
- Lim, H. K., Tan, C. P., Karim, R., Ariffin, A. A., & Bakar, J. (2010). Chemical composition and DSC thermal properties of two species of *Hylocereus* cacti seed oil: *Hylocereus undatus* and *Hylocereus polyrhizus*. *Food Chemistry*, 119(4), 1326-1331.
- Lima, C. A. D., Faleiro, F. G., Junqueira, N. T. V., & Bellon, G. (2014). Avaliação de características físicoquímicas de frutos de duas espécies de pitaya. *Revista Ceres*, 61(3), 377-383.
- Magalhães, D. S., Ramos, J. D., Pio, L. A. S., Boas, E. V. D. B. V., Pasqual, M., Rodrigues, F. A., & dos Santos, V. A. (2019). Physical and physicochemical modifications of white-fleshed pitaya throughout its development. *Scientia Horticulturae*, 243, 537-543.
- Magaña-Benítez, W., Balbín, A. M., Corrales, G. J., Saucedo, V. C., & Sauri, D. E. (2010). Frutas de pitahaya (*Hylocereus undatus*) frigoconservadas a 4°C en atmósferas controladas. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 11(2).
- Manzanero-Acevedo, L. A., Isaac-Márquez, R., Zamora-Crescencio, P., Rodríguez-Canché, L. G., Ortega-Haas, J. J., & Castillo, B. B. D. (2014). Conservación de la pitahaya [*Hylocereus undatus* (Haw.) Britton & Rose] en el estado de Campeche, México. *Foresta Veracruzana*, 16(1), 9-16.
- Márquez-Guzmán, G. J., Castillo-Martínez, R., & Livera-Muñoz, M. (2005). Caracterización morfológica y compatibilidad sexual de cinco genotipos de pitahaya (*Hylocereus undatus*). *Agrociencia*, 39(2), 183-194.

- Martínez C., R. (2011). Relaciones entre genotipo, productividad y calidad de fruto en pitahaya (*Hylocereus* spp.). Tesis Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. De México. 66 P.
- Mello, F. R. D., Bernardo, C., Dias, C. O., Gonzaga, L., Amante, E. R., Fett, R., & Candido, L. M. B. (2014). Antioxidant properties, quantification and stability of betalains from pitaya (*Hylocereus undatus*) peel. *Ciência Rural*, 45, 323-328.
- Meráz, A., Gómez, C., & Schwentesius, R. (2003). Pitahaya de México, Producción y Comercialización en el Contexto Internacional. Pitayas y Pitahayas. CA Flores V (ed). Universidad Autónoma Chapingo. pp, 99-116.
- Mizrahi, Y. (2015). Thirty-one years of research and development in the vine cacti pitaya in Israel. *Improving Pitaya Production and Marketing*, 1-18.
- Monytoya, A., Ramírez, C., Schweiggert, R., Villalobos, M. G., & Esquivel, P. (2011). Aprovechamiento de ingredientes desarrollados a base de pitaya. Póster. Universidad de Costa Rica, Escuela de Tecnología de Alimentos, San José.
- Naqvi, S. F. H., & Husnain, M. (2020). Betalains: Potential Drugs with Versatile Phytochemistry. *Critical Reviews™ in Eukaryotic Gene Expression*, 30(2).
- Nerd, Avinoam, Gutman, Feiga and Mizrahi, Yosef. 1999. Ripening and postharvest behavior of fruits of two *Hylocereus* species (*Cactaceae*). *Postharvest Biology and Technology*. 17(1):39-45.
- Nomura, K., Ide, M., & Yonemoto, Y. (2005). Changes in sugars and acids in pitaya (*Hylocereus undatus*) fruit during development, *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 80:6, 711-715, DOI: 10.1080/14620316.2005.11512003.
- Ortiz-Hernández H., Y.D. 1999. Pitahaya: un nuevo cultivo para México. Ed. Limusa-Grupo Noriega Editores, México D.F., Mexico. 111 p.
- Ortiz, T. A., & Takahashi, L. S. A. (2020). Pitaya fruit quality (*Hylocereus undatus* [Haworth] Britton & Rose) according to physiological maturity. A review. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 14(1), 63-75.
- Osuna Enciso, T., Ibarra Zazueta, M., Muy Rangel, M., Valdez Torres, J. B., Villarreal Romero, M., & Hernández Verdugo, S. (2011). Calidad postcosecha de frutos de pitahaya (*Hylocereus undatus* Haw.) cosechados en tres estados de madurez. *Revista fitotecnia mexicana*, 34(1), 63-72.
- Osuna-Enciso, T., Bustamante Francisco, B., Mendoza Torres, A. L., & Zea, M. F. (2007). Fenología reproductiva y calidad del fruto de pitahaya (*Hylocereus undatus*) en Sinaloa, México [Reproductive phenology and quality of pitahaya fruits (*Hylocereus undatus*) in Sinaloa, Mexico]. In *Anais do 12 Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas, Zacatecas*.

Parra, Y. M. (2010). Tamizaje fitoquímico y determinación de la actividad laxante de tallos y semillas de pitahaya (*Hylocereus triangularis*). Tesis de Grado. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. 123 p.

Repo de Carrasco, R., & Encina Zelada, C. R. (2008). Determinación de la capacidad antioxidante y compuestos bioactivos de frutas nativas peruanas. *Revista de la sociedad química del Perú*, 74(2), 108-124.

Rodeo, A. J., Castro, A. C., & Esguerra, E. B. (2018). Postharvest handling of dragon fruit (*Hylocereus* spp.) in the Philippines. In *Dragon Fruit Regional Network Initiation Workshop* (pp. 125-131).

Sánchez, C., Fischer, G., & Sanjuanelo, D. W. (2013). Stomatal behavior in fruits and leaves of the purple passion fruit (*Passiflora edulis* Sims) and fruits and cladodes of the yellow pitaya [*Hylocereus megalanthus* (K. Schum. ex Vaupel) Ralf Bauer]. *Agronomía Colombiana*, 31(1), 38-47.

Sánchez, C., Fischer, G., & Sanjuanelo, D. W. (2013). Stomatal behavior in fruits and leaves of the purple passion fruit (*Passiflora edulis* Sims) and fruits and cladodes of the yellow pitaya [*Hylocereus megalanthus* (K. Schum. ex Vaupel) Ralf Bauer]. *Agronomía Colombiana*, 31(1), 38-47.

Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). [14] Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in enzymology*, 299, 152-178.

Sornyatha, K., & Anprung, P. (2009). Bioactive compounds and stability of betacyanins from skin and flesh of red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus* (Weber) Britton & Rose). *J. Agric. Sci*, 40, 15-18.

Stintzing, F. C., & Carle, R. (2004). Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food, and in human nutrition. *Trends in food science & technology*, 15(1), 19-38.

Stintzing, F. C., Schieber, A., & Carle, R. (2002). Betacyanins in fruits from red-purple pitaya, *Hylocereus polyrhizus* (Weber) Britton & Rose. *Food Chemistry*, 77(1), 101-106.

Stintzing, F. C., Schieber, A., & Carle, R. (2003). Evaluation of colour properties and chemical quality parameters of cactus juices. *European Food Research and Technology*, 216(4), 303-311.

Strack, D., Vogt, T., & Schliemann, W. (2003). Recent advances in betalain research. *Phytochemistry*, 62(3), 247-269.

Teixeira, G. H. D. A., Durigan, J. F., Lima, M. A., Alves, R. E., & Filgueiras, H. A. C. (2005). Postharvest changes and respiratory pattern of bacuri fruit (*Platonia insignis* Mart.) at different maturity stages during ambient storage. *Acta Amazônica*, 35(1), 17-21.

- Tenore, G. C., Novellino, E., & Basile, A. (2012). Nutraceutical potential and antioxidant benefits of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) extracts. *Journal of functional foods*, 4(1), 129-136.
- Vaillant. F., Pérez, I. Dávila, M. Dornier, M. Reynes. (2005). Colorant and antioxidant properties of red pitahaya (*Hylocereus sp.*). *Fruits*, 60: 1-7.
- Van To, L., Ngu, N., Duc, N. D., & Huong, H. T. T. (2002). Dragon fruit quality and storage life: effect of harvesting time, use of plant growth regulators and modified atmosphere packaging. *Acta Horticulturae*. 575:611-621.
- Vásquez-Castillo, W., Aguilar, K., Vilaplana, R., Viteri, P., Viera, W., & Valencia-Chamorro, S. (2016). Calidad del fruto y pérdidas poscosecha de pitahaya amarilla (*Selenicereus megalanthus Haw.*) en Ecuador. *Agronomía Colombiana*, 34(1Supl), S1081-S1083.
- Vázquez, H. M. V. (2006). Técnicas alternativas para el control de enfermedades fungosas en frutos de Pitahaya (*Hylocereus undatus*). Tesis Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. De México. 114 p.
- Vázquez, J. F., & García-Vieyra, M. I. (2017). Perfil fitoquímico y actividad antioxidante de extractos de pitahaya *Hylocereus undatus*. *Jóvenes en la ciencia*, 2(1), 29-33.
- Wichienchot, S., Jatupornpipat, M., & Rastall, R. A. (2010). Oligosaccharides of pitaya (dragon fruit) flesh and their prebiotic properties. *Food Chemistry*, 120(3), 850-857.
- Wu, L. C., Hsu, H. W., Chen, Y. C., Chiu, C. C., Lin, Y. I., & Ho, J. A. A. (2006). Antioxidant and antiproliferative activities of red pitaya. *Food Chemistry*, 95(2), 319-327.
- Wybraniec, S., Nowak-Wydra, B., Mitka, K., Kowalski, P., & Mizrahi, Y. (2007). Minor betalains in fruits of *Hylocereus* species. *Phytochemistry*, 68(2), 251-259.

CAPÍTULO II. VARIABILIDAD Y HUELLA GENÉTICA DE GENOTIPOS DE PITAHAYA (*Hylocereus spp.*) CON MARCADORES SSR

2.1. RESUMEN

México es gran parte del centro de origen de las cactáceas y el género *Hylocereus* es un recurso genético importante a nivel nacional. La especie *H. undatus* tiene una gran importancia económica, sus frutos son muy apreciados por su apariencia y sabor; además, son fácilmente comercializados local y regionalmente, y se incrementa a nivel nacional y en el extranjero. Sin embargo, poco se conoce acerca de su diversidad biológica. Los estudios de variación genética en poblaciones naturales y entre líneas de mejoramiento son una parte esencial para la conservación y el aprovechamiento de los recursos genéticos para los programas de mejoramiento. Los objetivos del presente estudio fueron evaluar la diversidad y las relaciones genéticas en germoplasma de *Hylocereus spp.*, producidas por un programa de conservación y mejoramiento genético, así como obtener su huella genética mediante el uso de microsatélites SSR. Se detectaron 73 alelos mediante 14 loci SSR, con un rango de alelos por locus de 1 a 12, con 5.21 alelos en promedio. Las distancias genéticas entre las 31 accesiones oscilaron entre 0 y 0.785, con una media de 0.454. Se formaron dos grupos cada uno con dos subgrupos del total de accesiones, y se coincidió con el acervo genético compartido según STRUCTURE. Los métodos utilizados mostraron la cercanía biológica de los materiales por las características morfológicas coincidentes en las plantas, junto con las distancias genéticas y el poder discriminatorio de los SSR, que reflejan la diversidad en los materiales híbridos y los patrones alélicos para su plena identificación.

Palabras clave: *Hylocereus*, microsatélites SSR, huella genética, diversidad genética, recursos genéticos.

2.2. SUMMARY

Mexico is an important center of origin of cacti and the genus *Hylocereus* is an important genetic resource at national level. The *H. undatus* species has a great economic importance, its fruits are highly appreciated for their appearance and taste; furthermore, they are easily marketed locally and regionally, and it is increasing nationally and abroad. However, the knowledge about its biological diversity is deficient. Studies of genetic variation in natural populations and between breeding lines are an essential part for the conservation and use of genetic resources for breeding programs. The objectives of this study were to evaluate the diversity and genetic relationships in *Hylocereus spp.* Germplasm, produced by a genetic conservation and breeding program, as well as to obtain its genetic fingerprint through SSR microsatellites. Seventy-three alleles were detected through 14 SSR loci, with a range of alleles per locus from 1 to 12, with 5.21 alleles on average. The genetic distances in the 31 accessions ranged from 0 to 0.785, with a mean of 0.454. Two groups were formed each with two subgroups of the total accessions, and the shared gene pool according to STRUCTURE was matched. The methods used showed the biological closeness of the materials due to the coincident morphological characteristics in the plants, with the genetic distances and the discriminatory power of the SSRs, which reflect the diversity in the hybrid materials and the allelic patterns for their full identification.

Keywords: *Hylocereus*, SSR microsatellites, genetic fingerprint, genetic diversity, genetic resources.

2.3. INTRODUCCIÓN

Las pitahayas (*Hylocereus spp.*) son originarias de regiones tropicales y subtropicales de América y se distribuye desde México hasta Brasil (Centurión *et al.*, 2008). El número de especies que pertenecen al género *Hylocereus* varía con el autor, García-Rubio *et al.*, 2015, mencionan 18 especies y Hunt (2006) 14. En México se distribuyen tres especies importantes por sus frutos (*H. undatus*, *H. Ocamponis*, *H. Purpussi* (Livera *et al.*, 2010). Estas tres especies anteriores se distribuyen en los estados de Quintana Roo, Yucatán, Tabasco, Veracruz, Guerrero, Querétaro, Estado de México, Puebla, Oaxaca, Michoacán, Jalisco, San Luis Potosí, Colima y Sinaloa (Guzmán *et al.*, 2007). Según SIAP (2019), a nivel nacional la producción fue de 9, 019.14 t con un rendimiento de 6.04 t ha⁻¹ y un valor de producción de \$ 172,323.79 pesos. Hasta el 2016, el estado de Yucatán fue el principal productor de pitahaya, principalmente en huertos familiares (Centurión *et al.*, 2008). Este estado tuvo una producción de 2, 837.07 t, más de la mitad del total nacional, seguido por los estados de Quintana Roo, Puebla, Tabasco y Guerrero (SIAP, 2016). Para 2019, Quintana Roo y Yucatán fueron los mayores productores con 4,409.86 y 4,002.23 t, respectivamente, y solamente Yucatán superó el rendimiento promedio nacional con 11.61 t ha⁻¹ (SIAP, 2019). Europa en países como Italia y España; esta fruta tiene su nicho en el mercado de frutas exóticas y ha crecido recientemente en Israel, Australia, Vietnam, Malasia, Indonesia, Tailandia, Filipinas, Taiwán y Sri Lanka (Kishore, 2016). La especie *H. undatus* tiene una gran importancia económica en México, sus frutos son muy apreciados por su apariencia y sabor; además son fácilmente comercializados en mercados locales, regionales y se incrementa su comercio en el mercado nacional y extranjero. Esta planta se puede aprovechar integralmente y si bien se destaca por la importancia económica de sus frutos, también se aprovechan los tallos

jóvenes como alimento (Montesinos-Cruz *et al.*, 2015). No obstante, en comparación con el avance del cultivo de las pitahayas en otros países, la producción y consumo en México no son significativos, ya que por ejemplo Vietnam es el principal exportador de pitahayas en el mundo, tiene casi 40.000 ha cultivadas con esta especie, con una producción aproximada de un millón de toneladas (ADAWR, 2017; Ortiz y Takahashi, 2020), siguiendo en importancia Colombia, Nicaragua, Brasil, entre otros.

Para que las pitahayas sean aceptadas en los mercados nacionales e internacionales, además del atractivo visual, deben tener características de sabor y propiedades nutricionales que atraigan a los consumidores y una vida de anaquel que coadyuve a su distribución en los mercados. A la fecha se ha documentado su alto contenido de vitamina C, minerales, antioxidantes, y se le considera que tiene propiedades que coadyuvan a conservar o mejorar algunas funciones del cuerpo humano (Tenore *et al.*, 2012; Wichienchot, 2010; Díaz, 2011; Figueroa *et al.*, 2011; Stintzing *et al.*, 2002; Herbach *et al.*, 2006; Wybraniec *et al.*, 2007). A esto se debe el interés creciente en el cultivo de la pitahaya en diversos países y en México. Para abastecer el mercado interno y competir en el mercado exterior, México necesita producir pitahayas de calidad en forma rentable y sostenible. Sin embargo, a la fecha no existen variedades registradas que puedan ser utilizadas por los productores. En este sentido, el programa de Genética del Colegio de Postgraduados desde 1993 ha estado trabajando para conocer las pitahayas del país y desarrollar opciones para producir frutos de calidad. A la fecha se han generado genotipos sobresalientes, con alto potencial productivo (20 t ha⁻¹ aproximadamente), autofértiles que contrasta con la necesidad de otros países de polinizar a mano y con fruta de calidad. En un estudio reciente, Villa-Martínez *et al.* (2021, datos no publicados,

capítulo uno del presente trabajo) se evaluó la calidad de fruto de 11 genotipos de pitahaya, de los cuales, nueve de los 11 genotipos evaluados se ubican entre los tamaños medianos y grandes de clasificaciones internacionales, con pesos de van desde los 330 g hasta los 495 g, en promedio. Así mismo, los genotipos tuvieron altos porcentajes de pulpa con respecto a la cáscara, entre 68 y 87 %, estos resultados representan una mayor porción comestible de fruta y es uno de los atributos más buscados por el consumidor. En cuanto a la vida de anaquel, los frutos almacenados a 22 °C y con 56 % HR presentaron daños en cáscara por pardeamiento y dehiscencia de brácteas hasta después del día 8, y para el día 10 el porcentaje de pérdida de peso fue menor a 11 % en todos los genotipos. Por si solos, tanto el parámetro de acidez total (AT) como el de sólidos solubles totales (SST) no son buenos indicadores de calidad en el sabor del fruto, sin embargo, el índice SST/AT representa un buen índice para esto y valores menores de 40 en un fruto de pitahaya son preferidos por los consumidores. En dicho estudio se determinaron tres clases de frutos dependiendo del índice mostrado. Índices de 33 a 36 en 3 genotipos, con un dulzor bien definido y acidez equilibrados; índices de 50 a 54 los obtuvieron cuatro de los 11 genotipos con sabores semi dulces por la interacción de valores de SST entre 13 y 16 °Brix y porcentajes de AT entre 0.250 y 0.320; Finalmente, cuatro de los 11 genotipos presentaron los índices más altos entre 57 y 61, los cuales manifestaron un dulzor menos perceptible debido a porcentajes de AT por debajo de 0.250 y °Brix entre 12.5 y 15. Para los parámetros de Vitamina C, betalainas, fenoles totales y capacidad antioxidante los 4 genotipos con pulpa en distintas tonalidades de rosa fueron los que obtuvieron los valores más altos, destacando el CP-178 y el CP-300.

Por lo tanto, los 11 genotipos estudiados presentan atributos que brindan un alto potencial para competir en el mercado. La gama de variedades logra reunir tamaño con buen llenado de pulpa, en lo general. Así mismo, tanto el equilibrio como las desviaciones mínimas que presentaron entre dulzor y acidez pueden cubrir los distintos gustos de los consumidores, con frutos dulces, de dulzor intermedio y/o agridulces que pueden tener, al final, un destino diferente entre el consumo en fresco y el procesado. Sin duda, en lo particular, de los frutos de cáscara rosa y pulpa blanca destacaron el CP-175 y CP-171, el primero por sus atributos de apariencia, frutos de tamaño grande, buen llenado de pulpa y dulzor bien definido, pero con la desventaja de una vida de anaquel más corta por rápida pérdida de peso en ambientes no controlados; el segundo genotipo destaca en frutos de tamaño grande, buen llenado de pulpa y dulzor intermedio, sin embargo, presentó el mismo problema de vida de anaquel que el anterior. Por otra parte, de los genotipos de frutos amarillos destacó el CP-182 con tamaño mediano de frutos alargados, una mejor vida de anaquel, buen llenado de fruta y de sabor fresco agridulce, su desventaja es la apariencia pues las brácteas representan un atractivo visual importante en esta fruta y el genotipo presentó la menor cantidad de estas. Así también, el CP-203 mostró una ventaja al ser el genotipo con mayor llenado de pulpa y poseer buen peso y apariencia externa, además de ser agridulce al paladar, sin embargo, la vida de anaquel se redujo más fácilmente que en los demás genotipos. Finalmente los frutos con pulpa en tonalidades de rosa destacaron los de los genotipos CP-178 y CP-300, el primero con atributos importantes para la preferencia del mercado como su peso, buen llenado de pulpa, bajo porcentaje de pérdida de peso en su vida de anaquel en ambientes no controlados a temperatura ambiente, un dulzor intermedio y con uno de los aportes

más buscados en el mercado: fuente importante de vitamina C, pigmentos, alto contenido de fenoles totales y su alta capacidad antioxidante por encima de 50 %. EL CP-300 destacó en mejor vida de anaquel por encima de los demás genotipos estudiados, buen llenado de fruta y un aporte importante de pigmentos, vitamina C, fenoles totales y alta capacidad antioxidante, la desventaja más marcada reside en su sabor, que, si bien no es un fruto desabrido, no se distingue mucho el dulzor por su bajo contenido de acidez.

Por lo anterior, es prioritario estudiar la variación genética de los materiales destacados de este programa, y en este sentido, los marcadores moleculares se han convertido en una herramienta eficiente para evaluar la variación genética en colecciones de germoplasma, diversos reportes destacan su empleo en pitahaya. Entre los marcadores utilizados están los AFLP (Amplified Fragment Length Polymorphisms) (Cisneros y Tel-Zur, 2013), RAPD (Random Amplified Polimorphic DNA) (Legaria-Solano *et al.*, 2005; Junqueira *et al.*, 2010; Rifat *et al.*, 2019), ISSR (Inter Simple Sequence Repeat) (Tao *et al.*, 2014) y SSR (Simple-sequence repeats) (Pan *et al.*, 2017; Nashima *et al.*, 2021). Estos últimos, han sido útiles para una variedad de aplicaciones en genética vegetal y mejoramiento, debido a su reproducibilidad, naturaleza multialélica, herencia codominante, abundancia relativa y buena cobertura del genoma (Varshney *et al.*, 2005).

Los estudios de variación genética en poblaciones naturales y entre líneas de mejoramiento son una parte esencial para la conservación y el aprovechamiento efectivo de los recursos genéticos para los programas de mejoramiento. Por ello, los objetivos del presente estudio fueron evaluar la diversidad y las relaciones genéticas entre 31 accesiones de pitahaya (*Hylcereus spp.*), incluido el grupo de 11 genotipos sobresalientes en calidad de fruto, producidas por un programa de conservación y

mejoramiento genético del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, y aunado a lo anterior obtener su huella genética mediante el uso de loci microsatélites SSR, todo ello con el fin de generar información útil para su mejoramiento genético así como la protección de los materiales generados.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal y extracción de ADN

Se emplearon 31 accesiones de *Hylocereus* spp establecidas en un sitio experimental ubicado en el estado de Veracruz, México (Cuadro 1). El ADN se extrajo de filocladodios utilizando 200 mg de tejido y el Kit de ADNg vegetal ChargeSwitch™ (Invitrogen) acoplado al robot de extracción KingFisher Flex (Thermo Scientific, Waltham, MA) siguiendo las instrucciones del fabricante con pequeñas adecuaciones que consistieron en utilizar 800 µL de buffer de lisis y 100 µL de reactivo A antes de la maceración, y luego adicionando otros 100 µL de buffer de lisis y 100 µL de reactivo A. El ADN extraído se evaluó cuantitativa y cualitativamente mediante absorbancia utilizando el espectrofotómetro NanoDrop ND2000 (Thermo Scientific, Waltham, MA) para obtener la concentración en ng ul⁻¹ y los valores de pureza aproximada comparando las relaciones 260/280 y 260/230 de acuerdo con el manual del equipo. Solamente los ADNs con valores entre 1.6 y 2.0 para las relaciones 260/280 y 260/230 se checaron en gel de agarosa al 0.8% para confirmar su integridad según Sambrook y Russell (2001) y utilizarlos para las aplicaciones posteriores.

Cuadro 1. Accesiones de *Hylocereus spp.* utilizadas en el estudio.

Clave	Accesión	Clave	Accesión
1	CP-140	17	MT-146
2	CP-203	18	PG-5
3	CP-128	19	HP1P2
4	CP-169	20	BRA-1
5	CP-195	21	BRA-2
6	CP-300	22	M1
7	CP-171	23	A
8	CP-175	24	B
9	CP-182	25	C
10	CP-178	26	D
11	CP-136	27	E
12	CP-141P	28	F
13	PG-3	29	G
14	PG-4	30	H
15	PG-1	31	BRA-3
16	PG-2		

PCR y detección de los marcadores SSR

Se utilizaron 14 marcadores moleculares SSR desarrollados por Pan *et al.* (2017) cuyos iniciadores y la secuencia del microsatélite se muestran en el Cuadro 2. Las reacciones de amplificación se hicieron en un volumen de 25 μ l con 20 ng de ADN genómico, 2 mM de MgCl₂, 1X Taq Buffer, 0.2 mM de cada dNTP's, 10 pmol de cada iniciador, 1 U GoTaq Flexi DNA Polymerase (Promega) y agua grado molecular suficiente para alcanzar el volumen final de reacción. La amplificación se hizo en el termociclador Gene Amp® PCR SYSTEM 9700 (Applied Biosystems, Singapur) utilizando un programa de PCR touchdown (Don *et al.*, 1991) que consistió en una desnaturalización inicial de 5 min a 95 °C, dos etapas de amplificación y una etapa de extensión final. La primera etapa consistió en 13 ciclos a 95 °C durante 30 s, 65-52 °C por 30 s, disminuyendo 1 °C por ciclo, y 72

°C durante 30 s. La segunda etapa fue de 20 ciclos a 95 °C por 30 s, 52 °C por 30 s, y 72 °C por 30 s a 95 °C, 30 s a 52 °C, y 30 s a 72 °C. a extensión final se hizo a 72 °C por 5 min.

La detección de los marcadores se hizo con 3 ul de reacción de PCR. Se utilizaron geles de poliacrilamida no desnaturizante 19:1 al 8 % y el sistema de electroforesis vertical CBS MG33-1063 (CBS Scientific®, EUA). Las reacciones se migraron durante 150 min a 250 V junto con 50 ng de escalerilla de 20 pb (Sigma, EUA). Después de este tiempo, se tiñeron con AgNO₃ (Sigma, EUA) para visualizar los fragmentos con base en el protocolo descrito en CIMMYT (2006). Los geles se fotografiaron con el transiluminador MiniBis Pro-16 mm (Bio Imaging Systems ®, Israel) y el tamaño de cada banda se obtuvo con el programa GelAnalyzer v. 19.1 para crear la matriz de datos moleculares correspondiente.

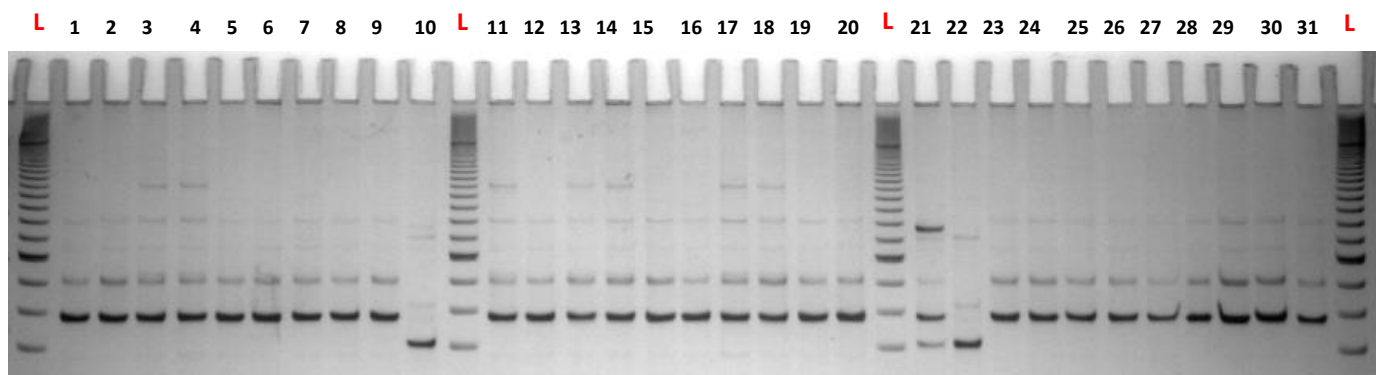


Figura 1. Polimorfismos del primer HLG009 usado para identificar las diferencias entre 31 accesiones de pitahaya (*Hylocereus spp.*). Accesiones: 1) CP-140, 2) CP-203, 3) CP-128, 4) CP-169, 5) CP-195, 6) CP-300, 7) CP-171, 8) CP-175, 9) CP-182, 10) CP-178, 11) CP-136, 12) CP-141P, 13) PG-3, 14) PG-4, 15) PG-1, 16) PG-2, 17) MT-146, 18) PG-5, 19) HP1P2, 20) BRA-1, 21) BRA-2, 22) M1, 23) A, 24) B, 25) C, 26) D, 27) E, 28) F, 29) G, 30) H, 31) BRA-3. Ladder (L)= 20pb.

Análisis de datos

A partir de la matriz de datos moleculares se obtuvo la huella genética de las 31 accesiones de *Hylocereus* y los parámetros para describir y visualizar su diversidad. Los parámetros [número total de alelos (N), del alelo más común (Nc), número de genotipos (Ng), diversidad genética (He), heterocigosidad observada (Ho) y el contenido de información polimórfica (PIC)] se obtuvieron con Power Marker V. 3.5 25 (Liu y Muse, 2005). Las relaciones genéticas de las 31 accesiones, con base en distancias euclidianas y el método de agrupamiento de Ward (Ward, 1963), se visualizaron mediante DARwin V. 6 (Perrier y Collet, 2006) y el análisis de coordenadas principales (PCoA) sobre la base de datos de disimilitudes se obtuvo con GenAlEx V.6.503 (Peakall & Smouse, 2012) para Microsoft Excel.

El análisis de estructura genética del germoplasma se realizó mediante el programa STRUCTURE (Pritchard *et al.*, 2000), a través de un método de agrupamiento bayesiano para asignar individuos a grupos mediante la estimación de Markov Chain Monte Carlo (MCMC). El programa se ejecutó sin previa información con valores de K del 1 al 10, periodo de quemado de 10000 por 10000 iteraciones de MCMC para estimar las proporciones mezcladas (Q) y seleccionar la K más adecuada en la asignación de grupos, en tal caso se utilizó el programa en línea STRUCTURE Harvester (Earl y VonHoldt, 2012) y con el método de Evanno (Evanno *et al.*, 2005) se calculó la probabilidad logarítmica L (K) para cada K y la tasa de cambio de probabilidad (ΔK).

Cuadro 2. Lista de 14 microsatélites SSR utilizados en el estudio de 31 accesiones de *Hylocereus spp.*

Primer/locus	No. Accesoión (GenBank)	Unidad de repetición	Iniciador 5' - 3' (F: Front, R: Reverse)
HLG001	KU991859	(TTG) _n	F:GAAAGACCTTAGACCCCGTAAAA // R:ACCGATCAACAATAACTCACTCG
HLG002	KU991860	(ACA) _n	F:GAAAGACCTTAGACCCCGTAAAA // R:ACCGATCAACAATAACTCACTCG
HLG004	KU991862	(TG) _n	F:AACAACAGTACCTTAGGGTCACATC // R:AGTGTGTCCTCCCAAAGTAACAG
HLG005	KU991863	(CA) _n	F:CATATGAATGCTCACACGCAC // R:CAGTGGCCTTCTATGTGAGTTTT
HLG006	KU991864	(CCA) _n	F:GACCCTCTCTCTCTGCTTC // R:CTCCATCTCTCTGTCTGCTGGT
HLG007	KU991865	(AG) _n	F:GACGTGCAGTGACAGATTTACAG // R:ATCTCCTTCCTCAGTCTAGGGC
HLG008	KU991866	(TCG) _n	F:GGCTCCTCTGTTTTAGAAGCCT // R:CTCAAGAAGCTCGTTGAAGAGG
HLG009	KU991867	(CAT) _n	F:AACATGTACCACACAACCCTCTC // R:AAGGGAGATTTGAAGATGATGG
HLG013	KU991871	(TTG) _n	F:GGTAAGGTTGCCTATAGCTGGAT // R:GAAAATTGCAAGCTAGAAACGAA
HLG015	KU991873	(TC) _n	F:GGTCGAGCTTCATCTTTTGTTTC // R:AAAGGAGACAGAGATAATTCGTGC
HLG016	KU991874	(CGC) _n	F:ACGTCGTCTTATGGCTCGATAC // R:GAACTAGAGGAAGAGGCCGAAG
HLG017	KX233425	(CAC) _n	F:TCACCCAAACTACACAATCAC // R:GGCAGAGATGTCGATAGAGGTAA
HLG019	KX233427	(ACA) _n	F:TCTAGGACCTAACAAATCCAACCA // R:GTAGGAATGCCGGTAGAGGTAAG
HLG021	KX233429	(AGC) _n	F:ACTACGAGGAGGAGAGTGACCC // R:GAGAGAAGATGGGAATGGAAGTC

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diversidad genética de los loci

La diversidad genética de 31 accesiones de pitahaya (*Hylocereus spp.*) se estudió con 14 microsatélites SSR (Cuadro 3), los cuales mostraron diferente grado de polimorfismo. Los loci HLG006 y HLG016 fueron monomórficos, mientras que los otros 12 mostraron una amplificación polimórfica. En total, se detectaron 73 alelos. El número de alelos amplificados por locus fue variable, desde 1 a 12 con 5.21 alelos como promedio. La frecuencia de alelos osciló de 0.29 (HLG008) a 0.97 (HLG017), con una media de 0.64. El número de genotipos fue de 2 (HLG017 y HLG021) a 15 (HLG001 y HLG002) con promedio de 6.36.

La diversidad genética promedio observada fue de 0.47. El valor mayor en diversidad se observó en el locus HLG002 con 0.84 y el valor menor fue de 0.18 en el locus HLG013.

Así también, la heterocigosidad promedio esperada fue de 0.24. Hubo tres loci que resultaron con valores mayores al resto: HLG001, HLG002 y HLG008. Los loci monomórficos mostraron cero heterocigosidad junto con los loci HLG013, HLG015, HLG017 y HLG021. En cuanto al contenido de información polimórfica (PIC), el locus más informativo fue HLG002 con 0.82, y el menos informativo fue el locus HLG017 con un valor de 0.06. El PIC promedio fue de 0.44.

Cuadro 3. Parámetros genéticos de 14 loci estudiados en accesiones de pitahaya (*Hylocereus spp.*)

Locus	N	Nc	Ng	He	Ho	PIC
HLG001	12.00	0.44	15.00	0.77	0.55	0.76
HLG002	11.00	0.31	15.00	0.84	0.55	0.82
HLG004	5.00	0.77	6.00	0.39	0.19	0.37
HLG005	11.00	0.31	12.00	0.80	0.52	0.77
HLG006	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
HLG007	4.00	0.56	7.00	0.61	0.32	0.57
HLG008	4.00	0.29	6.00	0.75	0.55	0.70
HLG009	5.00	0.69	5.00	0.48	0.10	0.43
HLG013	3.00	0.90	3.00	0.18	0.00	0.17
HLG015	3.00	0.71	3.00	0.44	0.00	0.39
HLG016	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
HLG017	2.00	0.97	2.00	0.06	0.00	0.06
HLG019	9.00	0.35	11.00	0.79	0.52	0.76
HLG021	2.00	0.68	2.00	0.44	0.00	0.34
Mean	5.21	0.64	6.36	0.47	0.24	0.44

N, número total de alelos; Nc, alelo más común; Ng, número de genotipos; He, diversidad genética, Ho, heterocigosidad observada; PIC, contenido de información polimórfica

Agrupamiento y diversidad de las accesiones

Las 31 accesiones de *Hylocereus spp* formaron dos grupos cada uno con dos subgrupos (Figura 1). El grupo I (GI) incluyó la mayoría de las accesiones estudiadas las cuales se organizaron en dos subgrupos (GI A y GI B). El subgrupo IA integró 12 genotipos: MT-146, CP-136, CP-178, PG-2, PG-1, PG-4, CP-203, CP-140, CP-169, CP-128, CP-300 y CP-195. En el subgrupo IB, se reagruparon 7 accesiones: PG-3, CP-141P, PG-5, CP-175, CP-171, HP1P2 y BRA-2. Por otra parte, el grupo II se dividió en dos subgrupos, IIA

y IIB, donde IIA reagrupó 5 accesiones: BRA-3, H, CP-182, BRA-1 y M1. En el subgrupo IIB se integraron las accesiones A, B, C, D, E, F y G. En la figura 2 se muestra el análisis factorial de coordenadas principales (PCoA), que coincidió con el agrupamiento de grupos y subgrupos.

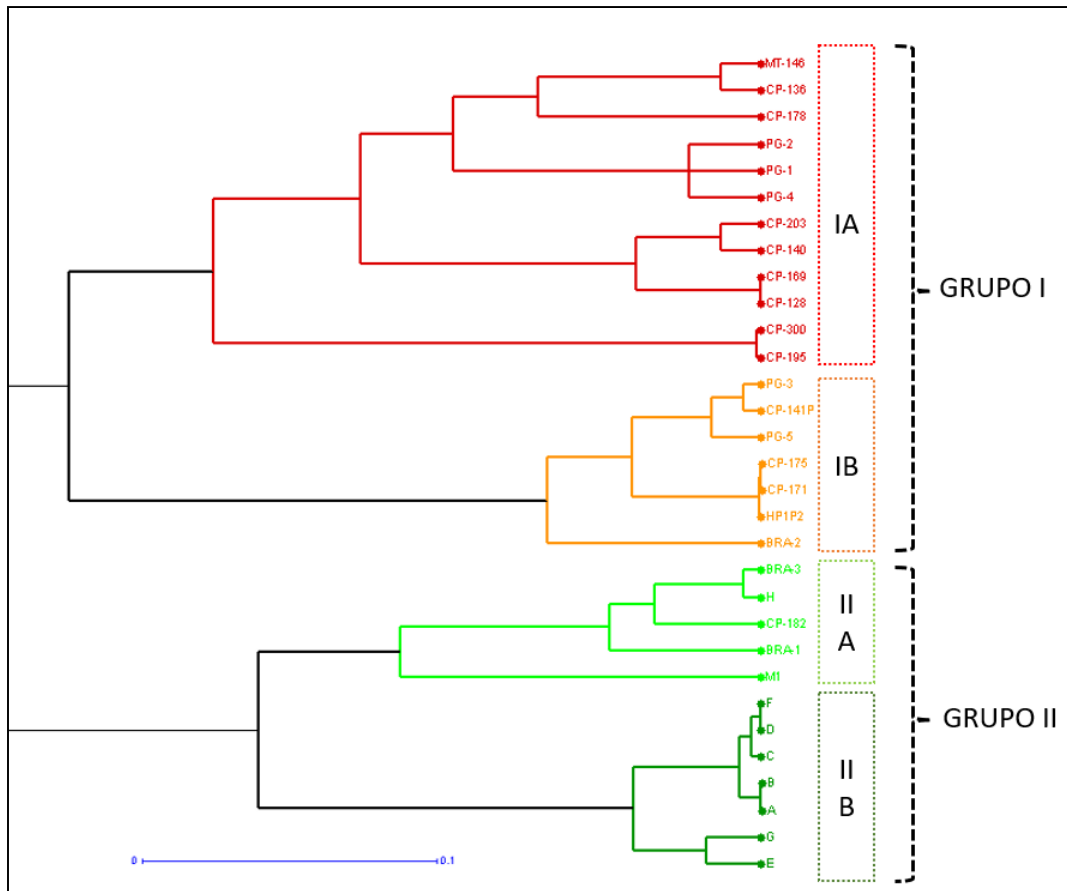


Figura 2. Dendrograma con las 31 accesiones de *Hylocereus* spp. Construido a partir del método de agrupamiento de Ward.

El análisis de diversidad entre estos grupos encontró que el número total de alelos (N) de los dos grupos de la población fue de 3.5. Entre subgrupos, se encontraron 2.75 como media en esta misma variable, con el subgrupo IA con el mayor número de alelos con 4. y los subgrupos IB y IIB con 2 alelos.

Entre grupos no hubo diferencia en la frecuencia alélica ($N_c=0.68$): sin embargo, entre los subgrupos la frecuencia de alelos fue mayor en el subgrupo IB y menor en el subgrupo IA, con 0.82 y 0.66, respectivamente. Así también, las combinaciones más diversas de genotipos (N_g) en la población se observaron en el grupo I con 5, y en promedio se observaron 4 combinaciones para toda la población tomando en cuenta ambos grupos.

La diversidad genética (H_e) media esperada en la población de 31 genotipos fue de 0.40, donde no hubo diferencia significativa entre los grupos revelados por el agrupamiento. Entre los cuatro subgrupos, derivados de los dos grandes grupos, se observó con mayor diversidad genética IA y IIA, con valores de 0.41 y 0.40, respectivamente, en comparación de los subgrupos IB y IIB. La heterocigosidad (H_o) media observada en la población fue de 0.25, donde los genotipos del grupo II mostraron mayor valor con 0.29, específicamente, el subgrupo IIB mostró la heterocigosidad más alta con 0.31. El contenido de información polimórfica (PIC) mostró un valor promedio para los dos grandes grupos de 0.37, y 0.30 entre los subgrupos. Así mismo, los genotipos en los subgrupos IA y IIA aportaron la mayor variabilidad en la población con 0.39 y 0.35, respectivamente (Cuadro 4).

Cuadro 4. Parámetros genéticos de 31 accesiones de pitahaya (*Hylocereus spp.*)

Grupos	N	Nc	Ng	Gs	He	Ho	PIC
G I	4	0.68	5	19	0.41	0.20	0.39
G II	3	0.68	3	12	0.39	0.29	0.36
Media	3.5	0.68	4	15.5	0.40	0.25	0.37

Subgrupos	N	Nc	Ng	Gs	He	Ho	PIC
G IA	4	0.66	4	12	0.41	0.23	0.39
G IB	2	0.82	2	7	0.25	0.15	0.22
G IIA	3	0.69	2	5	0.40	0.27	0.35
G IIB	2	0.78	2	7	0.27	0.31	0.23
Media	2.75	0.73	2.5	7.75	0.33	0.24	0.30

N, número total de alelos; Nc, alelo más común; Ng, número de genotipos; Gs, número de accesiones agrupadas He, diversidad genética, Ho, heterocigosidad observada; PIC, contenido de información polimórfica.

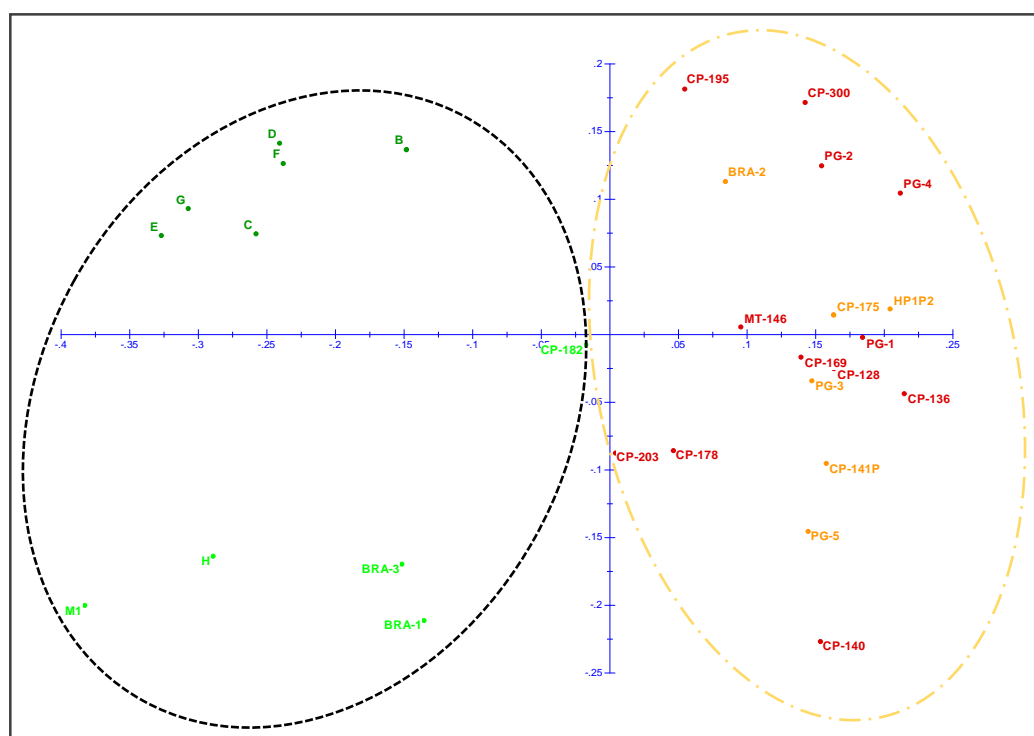


Figura 3. Análisis de coordenadas principales (PCoA) para 31 accesiones de *Hylocereus spp.* con 14 marcadores SSR. Óvalo punteado en amarillo indica Grupo I (subgrupo IA y subgrupo IB); círculo punteado negro indica Grupo II (subgrupo IIA y subgrupo IIB).

El análisis de coordenadas principales (PCoA) (Figura 3) mostró que las dos primeras coordenadas PC1 y PC2 explicaron 42.26% del total de variabilidad entre las 31 accesiones estudiadas. La contribución individual de PC1 y PC2 fue de 27.63 y 14.63, respectivamente. En el gráfico se apoya la distribución de grupos del dendrograma (Figura 3).

Estructura genética

Se determinaron dos grandes trasfondos genéticos entre las accesiones con base en el valor de ΔK sin información previa de agrupamiento (figura 4). El análisis arrojó probabilidades estimadas para $\ln K=1$ a $K=10$ las cuales variaron de -903.7 a -10174.66, y al aplicar el método de Evanno (Evanno *et al.*, 2005) el valor más alto de ΔK , por mucho, fue de 16.3859 en $K=2$ (figura 4), es decir, se descubrieron dos grandes trasfondos genéticos entre las accesiones. Los grupos formados integraron, por una parte, 21 accesiones en el grupo 1 (G1) y 10 accesiones en el grupo 2 (G2), sin embargo, las 31 accesiones mostraron mezcla, en mayor o menor medida, de ambos acervos genéticos generados (Figura 5).

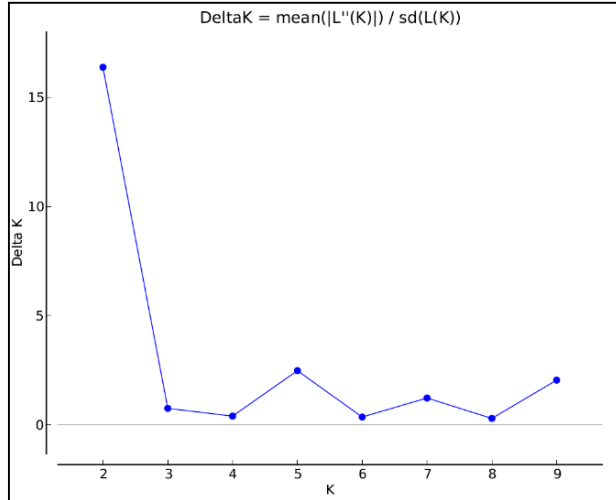


Figura 4. Valor de K=2 como el adecuado para la inferencia de la estructura de la población de acuerdo con el método de Evanno *et al.* (2005).

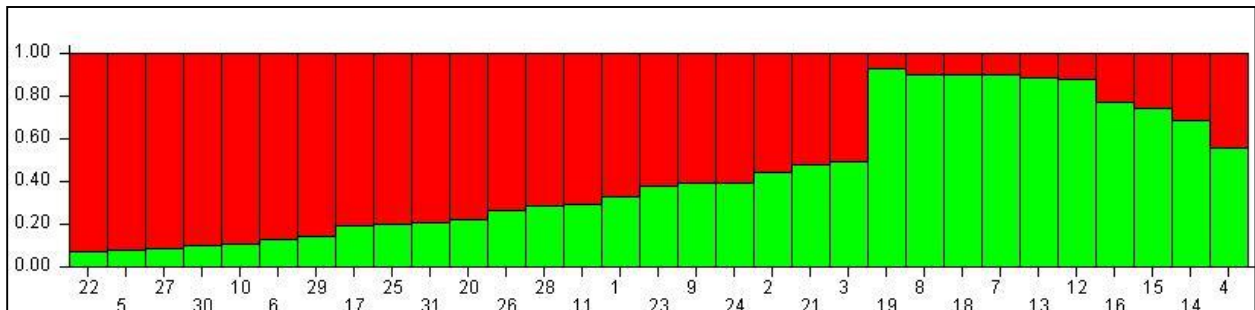


Figura 5. Estructura de la población inferida en K=2 sin información previa. Cada accesión está representada por una barra vertical y la longitud de cada segmento coloreado representa la pertenencia a cada acervo genético. Accesiones: 1) CP-140, 2) CP-203, 3) CP-128, 4) CP-169, 5) CP-195, 6) CP-300, 7) CP-171, 8) CP-175, 9) CP-182, 10) CP-178, 11) CP-136, 12) CP-141P, 13) PG-3, 14) PG-4, 15) PG-1, 16) PG-2, 17) MT-146, 18) PG-5, 19) HP1P2, 20) BRA-1, 21) BRA-2, 22) M1, 23) A, 24) B, 25) C, 26) D, 27) E, 28) F, 29) G, 30) H, 31) BRA-3.

Huella genética

Se seleccionaron 14 marcadores SSR para construir las huellas genéticas de ADN de las 31 accesiones de *Hylocereus spp.*, estos fueron HLG001, HLG002, HLG003, HLG005, HLG006, HLG007, HLG008, HLG009, HLG013, HLG015, HLG016, HLG017, HLG019 y HLG021.

La optimización de las PCR para cada marcador molecular permitió la alta eficiencia de éstos para identificar los genotipos, de tal manera que se obtuvieron un total de 538 bandas y un promedio de 17 bandas por accesión. Los perfiles genéticos fueron creados a partir de los pesos moleculares de cada marcador SSR (pares de bases, pb), donde la secuencia más pesada fue de 226pb y menos pesada de 105 pb, la primera mostrada en la accesión respectivamente (Cuadro 5, figura 6).

Cuadro 5. Perfiles genéticos de las 31 accesiones de *Hylocereus spp.* a partir de 14 marcadores moleculares SSR, expresados en pares de bases (pb).

ACCESIÓN	HLG001	HLG002	HLG004	HLG005	HLG006	HLG007	HLG008	HLG009	HLG013	HLG015	HLG016	HLG017	HLG019	HLG021
CP-140	160/160	157/178	146/146	142/164	159/159	159/153	155/155	157/157	147/147	144/144	105/105	122/122	131/146	148/148
CP-203	157/178	157/178	146/146	142/142	159/159	153/153	152/155	157/157	147/147	144/144	105/105	122/122	134/146	148/148
CP-128	152/160	157/149	146/146	142/164	159/159	159/153	149/149	157/157	147/147	142/142	105/105	122/122	134/146	148/148
CP-169	152/157	157/149	146/146	142/164	159/159	159/153	149/149	157/157	147/147	142/142	105/105	122/122	134/146	148/148
CP-195	163/187	163/187	146/154	140/140	159/159	153/153	152/152	157/157	150/150	142/142	105/105	122/122	141/141	148/148
CP-300	163/187	163/187	146/154	140/140	159/159	153/153	149/149	157/157	150/150	142/142	105/105	122/122	141/141	148/148
CP-171	157/157	157/157	146/146	144/166	159/159	153/157	155/155	157/157	147/147	142/142	105/105	122/122	134/134	148/148
CP-175	157/157	157/157	146/146	144/166	159/159	153/157	155/155	157/157	147/147	142/142	105/105	122/122	134/134	148/148
CP-182	157/146	157/157	146/146	142/142	159/159	153/153	152/158	157/157	147/147	142/142	105/105	122/122	143/158	148/148
CP-178	137/137	139/139	148/148	116/142	159/159	153/159	149/149	142/142	147/147	142/142	105/105	122/122	131/131	148/148
CP-136	149/149	148/148	146/154	160/166	159/159	159/159	149/155	157/157	147/147	142/142	105/105	122/122	131/131	148/148
CP-141P	157/157	154/154	146/146	144/166	159/159	157/151	155/155	157/157	147/147	140/140	105/105	122/122	134/134	148/148
PG-3	157/157	154/154	146/146	144/166	159/159	157/157	149/149	157/157	147/147	140/140	105/105	122/122	147/134	148/148
PG-4	154/154	151/151	146/146	144/158	159/159	157/157	149/149	157/157	147/147	142/142	105/105	122/122	147/147	148/148
PG-1	146/146	148/148	146/146	142/166	159/159	151/151	149/155	157/157	147/147	142/142	105/105	122/122	147/147	148/148
PG-2	154/146	154/149	146/146	144/144	159/159	151/151	149/149	157/157	147/147	142/142	105/105	122/122	134/144	148/148
MT-146	151/151	151/151	146/154	160/166	159/159	159/159	152/158	157/157	147/147	142/142	105/105	122/122	131/131	148/148
PG-5	157/157	157/157	146/146	142/142	159/159	157/151	149/149	157/157	147/147	140/140	105/105	122/122	134/147	148/148
HP1P2	157/157	157/157	146/146	144/166	159/159	157/151	155/155	157/157	147/147	142/142	105/105	122/122	134/134	148/148
BRA-1	157/143	157/139	146/146	146/146	159/159	153/157	152/158	157/157	147/147	140/140	105/105	122/122	131/131	151/151
BRA-2	157/157	157/157	150/150	144/112	159/159	157/157	152/158	157/226	144/144	142/142	105/105	122/122	134/134	148/148
M1	143/143	142/142	150/158	140/140	159/159	153/153	152/158	142/142	147/147	140/140	105/105	113/113	131/131	151/151
A	157/178	154/175	146/146	144/144	159/159	153/153	152/158	157/157	147/147	142/142	105/105	122/122	134/147	151/151
B	157/178	154/175	146/146	144/144	159/159	153/153	152/158	157/157	147/147	142/142	105/105	122/122	134/147	151/151
C	157/178	154/175	146/146	142/142	159/159	153/153	152/158	160/160	147/147	142/142	105/105	122/122	134/147	151/151

D	157/178	154/175	146/146	144/144	159/159	153/153	152/158	160/160	147/147	142/142	105/105	122/122	134/147	151/151
E	157/146	154/142	148/154	142/142	159/159	153/153	152/158	160/160	147/147	142/142	105/105	122/122	144/144	151/151
F	157/178	154/178	146/146	144/144	159/159	153/153	152/158	160/160	147/147	142/142	105/105	122/122	134/147	151/151
G	157/178	154/178	148/148	142/152	159/159	153/153	152/158	160/184	147/147	142/142	105/105	122/122	134/147	151/151
H	157/146	157/148	146/146	142/152	159/159	153/153	152/158	160/184	147/147	140/140	105/105	122/122	144/162	151/151
BRA-3	157/146	157/148	146/146	142/142	159/159	153/153	152/158	160/160	147/147	140/140	105/105	122/122	144/162	148/148

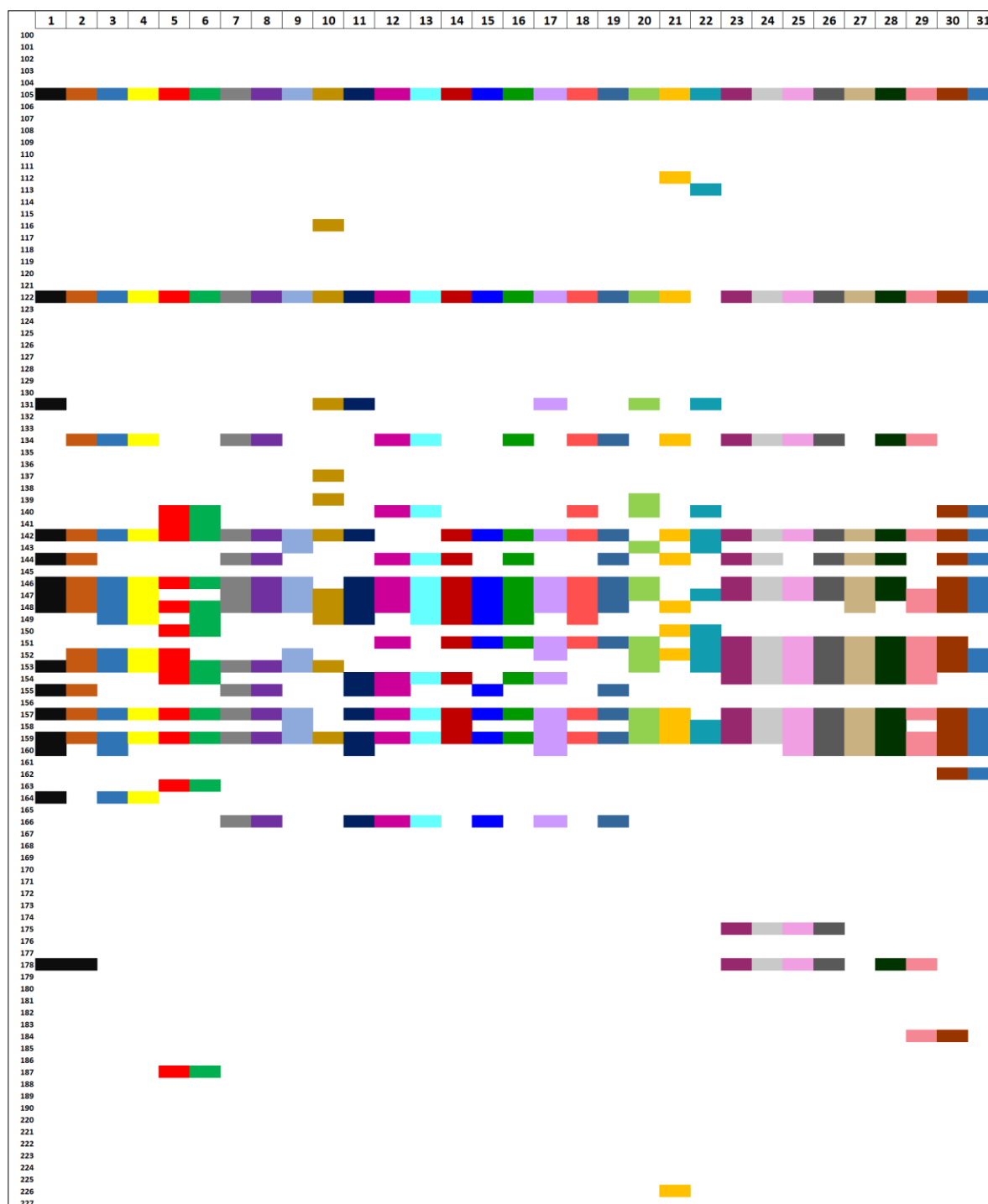


Figura 6. Huella genética de las 31 accesiones de *Hylocereus spp.* a partir de 14 marcadores moleculares SSR, expresados en pares de bases (pb). Accesiones: 1) CP-140, 2) CP-203, 3) CP-128, 4) CP-169, 5) CP-195, 6) CP-300, 7) CP-171, 8) CP-175, 9) CP-182, 10) CP-178, 11) CP-136, 12) CP-141P, 13) PG-3, 14) PG-4, 15) PG-1, 16) PG-2, 17) MT-146, 18) PG-5, 19) HP1P2, 20) BRA-1, 21) BRA-2, 22) M1, 23) A, 24) B, 25) C, 26) D, 27) E, 28) F, 29) G, 30) H, 31) BRA-3.

importante en los años de ejecución del programa de mejoramiento del Colegio de Postgraduados. De los parámetros anteriores, Pan *et al.* (2017) reportaron valores ligeramente más altos en rangos de He de 0.3022 a 0.9632 y una media de 0.6956; PIC de 0.2634 a 0.7539 y una media de 0.5372 que atribuyen, tanto a la naturaleza de polinización cruzada y mayor heterocigosidad de la pitahaya, como a su amplio genoma. Por otro lado, recientemente, otros autores como Nashima *et al.* (2021), desarrollaron 16 marcadores SSR que mostraron 154 alelos. Estos marcadores, sugirieron un alto polimorfismo (PIC promedio=0.72) en 32 accesiones estudiadas. El rango de N fue de 6 a 12, con una media de 7.93: He con rango de 0.50 a 0.85, y media de 0.74; y PIC con rango de 0.47 a 0.83 lo cual demuestra el poder discriminativo de este tipo de marcadores. Los microsatélites en los últimos años han adquirido mayor relevancia, pues han demostrado ser informativos por su naturaleza multialélica y la facilidad de su análisis (Gao *et al.*, 2005), de tal manera que este tipo de marcadores han resultado adecuados para determinar variantes genéticas con base en la PCR y utilizarlos para identificar variedades, realizar estudios de diversidad genética y filogenia, construir mapas genéticos y de ligamiento, así determinar huellas genéticas.

Con los 14 loci utilizados en esta investigación, se obtuvo un porcentaje de polimorfismo de 85.71% en las 31 accesiones estudiadas. Diversas investigaciones también han demostrado la efectividad de otro tipo de marcadores moleculares en la identificación de germoplasma de pitahaya con altos porcentajes de polimorfismo, tal es el caso de Tao *et al.* (2014), quienes mediante 111 ISSR obtuvieron un polimorfismo de 66.12% en 50 accesiones. Legarías-Solano *et al.* (2005), y por su parte, encontraron 92.5% en 50 accesiones mediante RAPD, similar al 95.06% detectado por Junqueira *et al.* (2010) con

164 marcadores en 13 accesiones estudiadas y al de Rifat *et al.* (2019) con 86.05%. Así mismo, con los marcadores AFLP se han obtenido porcentajes mayores a 95% de polimorfismo en accesiones y su progenie (Cisneros y Tel-Zur, 2013).

Diversidad genética

En México, el conocimiento sobre la diversidad biológica de *Hylocereus* es deficiente y solamente se ha visto a nivel de cultivo de traspatio y en plantaciones de reciente creación, produciendo los cultivares comerciales de *H. undatus* mayormente. Las accesiones generadas en el programa de mejoramiento genético de recursos de cactáceas, del Colegio de Postgraduados, sugieren un estado de hibridación con avances significativos en el desarrollo de nuevos cultivares con características sobresalientes. La diversidad genética de 31 accesiones de *Hylocereus spp.* fue evaluada mediante 14 marcadores SSR y analizada mediante distancias euclidianas y el método de agrupamiento de Ward. En general, los materiales son genéticamente diversos, como lo demuestran los subgrupos GIA y GIIA (0.41 y 0.40, respectivamente) los cuales tuvieron una diversidad mayor al promedio de 0.33 de los cuatro subgrupos generados. Pan *et al.* (2017) utilizaron en total 21 marcadores moleculares, en los cuales se incluyeron los 14 utilizados en el presente trabajo, estudiaron la diversidad genética de 41 materiales de *Hylocereus spp.*, y obtuvieron una $He=0.645$.

Las distancias genéticas entre las 31 accesiones tuvieron un rango desde 0 hasta 0.78571, con una media de 0.45476. La diferencia entre las distancias genéticas mayor y menor sugiere que las relaciones genéticas entre las 31 accesiones estudiadas son grandes, y con ello, queda de manifiesto la diversidad biológica de los materiales. A pesar de lo anterior, en el dendrograma (figura 2) se observa que los miembros del GI forman

parte de un clado con un ancestro en común, que en este caso significa que son materiales producto de la hibridación. En esta clasificación se adoptaron subgrupos, donde el subgrupo IA contiene la mayoría de las accesiones con características sobresalientes de fruto. Aquí se encuentran CP-136, MT-146 y CP-140 con frutos de pulpa blanca y cáscara rosa; los frutos CP-128, CP-169 y CP-300 con pulpa y cáscara rosa, así mismo la CP-178 posee pulpa rosa más oscuro y cáscara rosa. Además, CP-195 y CP-203 las cuales son de pulpa blanca y cáscara amarilla. Por otro lado, en el subgrupo IB las accesiones CP-141P, HP1P2, CP-175 y CP-171 tienen frutos con pulpa blanca y cáscara rosa. Para el resto de las accesiones (subgrupo IIA y IIB) no fue posible determinar por característica de fruto pues son accesiones jóvenes en edad no reproductiva, excepto CP-182 que se encuentra en subgrupo IIA, y sus frutos son de cáscara amarilla y pulpa blanca. Nashima *et al.* (2021) menciona las características típicas del fruto de *H. undatus* como la pulpa blanca y cáscara rosa, así mismo, la pulpa rosa en distintos tonos es producto de cruzamiento entre *H. undatus* y otras especies de *Hylocereus*; y los frutos amarillos y pulpa blanca pertenecen a la especie *H. megalanthus*. Los frutos con pulpa más oscura son característicos de *H. costaricensis* o *H. monacanthus*, así como *H. Polyrhizus* (Lim *et al.*, 2012). La agrupación, por los métodos utilizados, manifestó cercanía por las características morfológicas coincidentes en las plantas, junto con las distancias genéticas, que reflejan la diversidad en los materiales híbridos.

Estructura de la población

El programa Structure analiza las diferencias en la distribución de variantes genéticas entre poblaciones con un algoritmo iterativo bayesiano colocando a los individuos en

grupos cuyos miembros comparten patrones de variación similares (Porrás-Hurtado *et al.*, 2013). En el caso del germoplasma analizado, la asignación de las accesiones en Structure mostró mezcla, con coeficientes de pertenencia en 21 de las 31 accesiones, entre 50 y 95%, que corresponde al agrupamiento G1. En las 10 accesiones que conformaron G2 el coeficiente de pertenencia varió de 56 a 95%. Los métodos de agrupamiento utilizados mostraron diferencias en la asignación de grupos para las 31 accesiones, tanto el método de Ward como el de Structure, dividieron el germoplasma en conglomerados donde algunas accesiones se ubican en diferentes grupos. Es el caso de las accesiones CP-169 y CP-128, así como BRA-2, donde las dos primeras se encontraban en el mismo grupo utilizando Ward, y mediante Structure estas accesiones fueron separadas, de tal manera que CP-128 se agrupó junto a BRA-2. Al respecto, Samah *et al.* (2016) mencionan que entre métodos de agrupamiento podría haber incongruencias en los resultados, principalmente, debido a los menores coeficientes de pertenencia. En dicho estudio, las accesiones de *Opuntia sp.* que se estudiaron y tuvieron coeficientes de pertenencia menores a 70% mostraron también esta diferencia en los agrupamientos por medio de dos métodos, uno multivariado y el de Structure. En el caso del germoplasma de pitahaya del presente estudio, las tres accesiones antes mencionadas presentaron los coeficientes de pertenencia más bajos; 56, 50 y 53%, respectivamente. Por el contrario, otros materiales se agruparon mediante ambos métodos de conglomerado, es el caso de las accesiones HP1P2, CP-175, CP-171, PG-5, CP-141P y PG-3, los cuales presentaron un coeficiente de pertenencia entre 88 y 95% en Structure. Lo anterior representa los grados de mezcla que tienen los materiales, el

acervo genético que se comparte entre el germoplasma y que ha sido producto de los trabajos de hibridación de un programa de mejoramiento genético.

Huella genética

La huella genética de 31 accesiones de *Hylocereus spp* se determinó con 14 marcadores SSR. Dos de estos marcadores detectaron una única variante (monomórficos) en tanto que 12 de ellos presentaron polimorfismo. Con estos marcadores, se identificaron dos pares de accesiones con 100% de concordancia las cuales fueron CP-175 y CP-171, y, A y B, lo cual sugiere que pueden ser clones como lo indica el análisis de las características morfológicas de la planta y fruto. Similarmente, algunos pares de accesiones como CP-128 y CP-169; CP-195 y CP-300; D y F; BRA-3 y H se agruparon con una cercanía de 0.035, 0.071, 0.035, 0.142, respectivamente, debido a la variación en solamente uno o dos marcadores. Este nivel de detalle confirmó el poder discriminatorio de los SSR seleccionados para distinguir cada material y, por lo tanto, construir la huella genética del germoplasma estudiado.

2.6. CONCLUSIONES

El conocimiento de la diversidad genética en germoplasma de *Hylocereus spp.* es de suma importancia para determinar el acervo genético que se comparte entre accesiones. La metodología de microsatélites SSR empleada en este estudio ha permitido el descubrimiento de las relaciones entre los genotipos presentes en la población de pitahaya, así como la determinación de la huella genética, no sólo en la identificación de genotipos, sino también, como un complemento para el rastreo y protección del derecho de propiedad intelectual de los materiales sobresalientes en calidad de fruto que han sido

generados por el programa de mejoramiento y conservación de recursos de cactáceas del Colegio de Postgraduados.

2.7.LITERATURA CITADA

ADAWR, Australian Department of Agriculture and Water Resources. (2017). Final report for the review of biosecurity import requirements for fresh dragon fruit from Vietnam. Department of Agriculture and Water Resources, Canberra, Australia.

Bravo-Hollis, H. (1978). Las cactáceas de México. México: Universidad Nacional Autónoma de México xvi, Vol I. 743p.-illus., col. illus., keys. Sp Icones. Geog, 4.

Centurión Y. A. R., Pereira, S. S., Veloz, C. S., Sañudo, R. B., & Duch, E. S. (2008). Cambios físicos, químicos y sensoriales en frutos de pitahaya (*Hylocereus undatus*) durante su desarrollo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(1), 1-5.

CIMMYT (2006) Protocolos de laboratorio; laboratorio de genética molecular aplicada. CIMMYT. 3ra ed. México, D.F. 93 p.

Cisneros, A., & Tel-Zur, N. (2013). Genomic analysis in three *Hylocereus* species and their progeny: evidence for introgressive hybridization and gene flow. *Euphytica*, 194(1), 109-124.

Díaz, J. U. (2011). Biología y manejo postcosecha de Pitahaya roja y amarilla (*Hylocereus spp.*, y *Selenicereus spp.*). *La Calera*, 5(6), 44-49.

Don, R. H., P. T. Cox, B. J. Wainwright, K. Baker and J. S. Mattick (1991) 'Touchdown' PCR to circumvent spurious priming during gene amplification. *Nucleic Acids Research* 19: 4008, doi:10.1093/nar/19.14.4008

Earl, D.A., vonHoldt, B.M., 2012. STRUCTURE HARVESTER: a website and program for visualizing STRUCTURE output and implementing the Evanno method. *Conserv. Genet. Resour.* 4, 359–361. <https://doi.org/10.1007/s12686-011-9548-7>.

Evanno, G., Regnaut, S., Goudet, J., 2005. Detecting the number of clusters of individuals using the software STRUCTURE: a simulation study. *Mol. Ecol.* 14, 2611–2620. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2005.02553.x>.

Gao LZ, Zhang CH, Jia JZ (2005) Cross-species transferability of rice microsatellites in its wild relatives and the potential for conservation genetic studies. *Genet Resour Crop Evol* 52:931–940. doi:10.1007/ s10722-003-6124-3

García-Rubio, L. A., Vargas-Ponce, O., Ramírez-Mireles, F. D. J., Munguía-Lino, G., Corona-Oceguera, C. A., & Cruz-Hernández, T. (2015). Distribución geográfica de *Hylocereus* (*Cactaceae*) en México. *Botanical Sciences*, 93(4), 921-939.

Guzmán U., Arias S., Dávila P. (2007). Catálogo de cactáceas mexicanas. UNAM-CONABIO. México, D. F. 315p.

- Junqueira, K. P., Faleiro, F. G., Bellon, G., Junqueira, N. T. V., Fonseca, K. G. D., Lima, C. A. D., & Santos, E. C. D. (2010). Variabilidade genética de acessos de pitaya com diferentes níveis de produção por meio de marcadores RAPD. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 32(3), 840-846.
- Kishore, K. (2016). Phenological growth stages of dragon fruit (*Hylocereus undatus*) according to the extended BBCH-scale. *Scientia Horticulturae*, 213, 294-302.
- Lim, H.K., Tan, C.P., Bakar, J., Ng, S.P., 2012. Effects of different wall materials on the physicochemical properties and oxidative stability of spray-dried microencapsulated red-fleshed pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) seed oil. *Food Bioprocess Technol.* 5, 1220–1227.
- Liu K. and Muse S. (2005). PowerMarker. Integrated analysis environment for genetic marker data. *Bioinformatics* 21: 2128–2129. Doi: 10.1093/bioinformatics/bti282
- Livera-Muñoz, M., Ortiz-Hernández, Y. D., Castillo-Martínez, R., Castillo-González, F., Martínez-Chávez, R., Ramírez-Delgadillo, J. J., & Carrillo-Salazar, J. A. (2010). Pitahaya (*Hylocereus* spp.): problemas, logros y perspectivas. En Cruz-Izquierdo S, A. Muratalla L. y AT Kato Y.(comps.). *La investigación al servicio del campo mexicano. Ed. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética. Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Montecillo, Edo. de México pp*, 69-71.
- Montesinos-Cruz, J. A., Rodríguez-Larramendi, L., Ortiz-Pérez, R., Fonseca-Flores, M. D. L. Á., Ruíz Herrera, G., & Guevara-Hernández, F. (2015). Pitahaya (*Hylocereus* spp.) un recurso fitogenético con historia y futuro para el trópico seco mexicano. *Cultivos Tropicales*, 36, 67-76.
- Nybom, H., Weising, K., & Rotter, B. (2014). DNA fingerprinting in botany: past, present, future. *Investigative genetics*, 5(1), 1-35.
- Ortiz, T. A., & Takahashi, L. S. A. (2020). Pitaya fruit quality (*Hylocereus undatus* [Haworth] Britton & Rose) according to physiological maturity. A review. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 14(1), 63-75.
- Ortiz-Hernández, Y. D., Livera-Muñoz, M., Carrillo-Salazar, J. A., Valencia-Botin, A. J., & Castillo-Martínez, R. (2012). Agronomical, physiological, and cultural contributions of pitahaya (*Hylocereus* spp.) in Mexico. *Israel Journal of Plant Sciences*, 60(3), 359-370.
- Pan, L., Fu, J., Zhang, R., Qin, Y., Lu, F., Jia, L., ... & Liang, G. (2017). Genetic diversity among germplasms of Pitaya based on SSR markers. *Scientia Horticulturae*, 225, 171-176.
- Peakall R., Smouse P. E. (2012). GenAIEx 6.5: genetic analysis in excel. Population genetic software for teaching and research-an update. *Bioinformatics* 28:2537-2539. doi:10.1093/bioinformatics/bts460
- Perrier X., Jacquemoud-Collet J. P. (2006). DARwin software. <http://darwin.cirad.fr/>. In., 6.0.010 edn

- Porras-Hurtado, L., Ruiz, Y., Santos, C., Phillips, C., Carracedo, Á., & Lareu, M. (2013). An overview of STRUCTURE: applications, parameter settings, and supporting software. *Frontiers in genetics*, 4, 98.
- Pritchard, J.K., Stephens, M.S., Donnelly, P., 2000. Inference of population structure using multilocus genotype data. *Genetics* 155, 945–959. <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2007.01758.x>.
- Rifat, T., Khan, K., & Islam, M. S. (2019). Genetic diversity in dragon fruit (*Hylocereus sp*) germplasms revealed by RAPD marker. *JAPS, Journal of Animal and Plant Sciences*, 29(3), 809-818.
- Rodríguez-Canto, A. (2000). Producción y Comercialización de pitahayas en México. *Rev. Claridades Agropecuarias*. 3-22 pp. México, D.F.
- Samah, S., Pardo, C. V. D. T., Cruz, M. A. S., & Valadez-Moctezuma, E. (2016). Genetic diversity, genotype discrimination, and population structure of Mexican *Opuntia sp.*, determined by SSR markers. *Plant molecular biology reporter*, 34(1), 146-159.
- Sambrook J, Rusell D. W. (2001). Vectors and bacterial strains. *Molecular cloning* 3: 3.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP (2016). Anuario estadístico de la producción agrícola. Disponible en: http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP (2019). Anuario estadístico de la producción agrícola. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Tao, J., Qiao, G., Wen, X. P., Gao, G. L., Liu, T., Peng, Z. J., ... & Zhang, B. X. (2014). Characterization of genetic relationship of dragon fruit accessions (*Hylocereus spp.*) by morphological traits and ISSR markers. *Scientia Horticulturae*, 170, 82-88.
- Varshney, R. K., Graner, A., & Sorrells, M. E. (2005). Genic microsatellite markers in plants: features and applications. *TRENDS in Biotechnology*, 23(1), 48-55
- Ward, JH. Jr. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association* 58: 236-244.
- Stintzing, F. C., Schieber, A., & Carle, R. (2002). Betacyanins in fruits from red-purple pitaya, *Hylocereus polyrhizus* (Weber) Britton & Rose. *Food Chemistry*, 77(1), 101-106.
- Tenore, G. C., Novellino, E., & Basile, A. (2012). Nutraceutical potential and antioxidant benefits of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) extracts. *Journal of functional foods*, 4(1), 129-136.
- Wichienchot, S., Jatupornpipat, M., & Rastall, R. A. (2010). Oligosaccharides of pitaya (dragon fruit) flesh and their prebiotic properties. *Food Chemistry*, 120(3), 850-857.
- Wybraniec, S., Nowak-Wydra, B., Mitka, K., Kowalski, P., & Mizrahi, Y. (2007). Minor betalains in fruits of *Hylocereus* species. *Phytochemistry*, 68(2), 251-259.

Herbach, K. M., Rohe, M., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2006). Structural and chromatic stability of purple pitaya (*Hylocereus polyrhizus* [Weber] Britton & Rose) betacyanins as affected by the juice matrix and selected additives. *Food Research International*, 39(6), 667-677.

Figueroa, R., Tamayo, J., González, S., Moreno, G., & Vargas, L. (2011). Actividad antioxidante de antocianinas presentes en cáscara de pitahaya (*Hylocereus undatus*). *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 12(1), 44-50.

CONCLUSIONES GENERALES

Actualmente la pitahaya es un cultivo emergente en México y el mundo, por lo que los trabajos realizados sobre la calidad de fruto en postcosecha, variabilidad y huella genéticas de diversos materiales de *Hylocereus spp.*, contribuyen al conocimiento sobre el estado actual del cultivo en el país, así como a la identidad de las variedades. El estudio de calidad reveló 11 genotipos para uso diverso según sus características postcosecha, pues brindan una amplia gama de opciones para el consumidor en cuanto al color, sabor, vida de anaquel y con un buen contenido nutricional de importancia en la salud como sustancias antioxidantes y vitamina C. En el estudio de variabilidad y huella genéticas de los materiales, se logró la identificación de 31 genotipos como un complemento para el rastreo y protección del derecho de propiedad intelectual de los cultivares generados por el programa de mejoramiento y conservación de recursos de cactáceas desarrollado por el Colegio de Postgraduados, incluyendo el grupo sobresaliente en calidad de fruto.

Lo anterior brinda una visión integral sobre el potencial productivo, conservación y uso de las especies de pitahaya descritas en este estudio y permite obtener información valiosa para la planeación de nuevas hibridaciones capaces de mejorar la calidad de la fruta, el potencial productivo y buscar mejorar las características agronómicas de la planta de pitahaya.

ANEXOS

ANEXO A. CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DE FRUTO POR GENOTIPO

A1. Láminas por genotipo

CP-175

CP-171

CP-140

CP-136

CP-300

CP-178

CP-169

CP-128

CP-203

CP-195

CP-182



CP-175

Fruto

Característica	Descripción	Unidad
Peso promedio	448.26	gramos
% Pérdida de peso	10.86	%
Forma	Ovalado	*Escala DE/DP
Rel. Pulpa/Cáscara	78.40	%

Brácteas



Característica	Descripción	Unidad
Forma	Espada	**Escala B/L
Densidad en fruto	16	
Densidad estomática	10.28	No. Estomas por campo

Pulpa y Cáscara



PULPA		
Característica	Descripción	Unidad
Color	84.15/10.23/116.85	LCH
SST	12.8	°Brix
SST/AT	33.04	
[Bc]	0.207	mg 100 g ⁻¹ pulpa
[Bx]	0.713	mg 100 g ⁻¹ pulpa
VitC	24.62	µg ml ⁻¹
FT	28	mg L ⁻¹ ácido gálico
CA	8.77	% RSC
CÁSCARA		
Color	52.43/9.28/47.66	LCH
Dens. Estomática	6.22	



CP-171

Fruto

Característica	Descripción	Unidad
Peso promedio	494.72	gramos
% Pérdida de peso	9.06	%
Forma	Ovalado	*Escala DE/DP
Rel. Pulpa/Cáscara	76.81	%

Brácteas



Característica	Descripción	Unidad
Forma	Mayormente espada	**Escala B/L
Densidad en fruto	18	
Densidad estomática	7.61	No. Estomas por campo

Pulpa y Cáscara



PULPA		
Característica	Descripción	Unidad
Color	80.61/9.38/112.42	LCH
SST	13.4	°Brix
SST/AT	52.61	
[Bc]	0.033	mg 100 g ⁻¹ pulpa
[Bx]	0.035	mg 100 g ⁻¹ pulpa
VitC	26.58	μg ml ⁻¹
FT	34.89	mg L ⁻¹ ácido gálico
CA	8.86	% RSC
CÁSCARA		
Color	53.38/2.62/51.39	LCH
Dens. Estomática	6.81	



CP-140

Fruto

Característica	Descripción	Unidad
Peso promedio	485.64	gramos
% Pérdida de peso	8.7	%
Forma	Ovalado	*Escala DE/DP
Rel. Pulpa/Cáscara	68.21	%

Brácteas

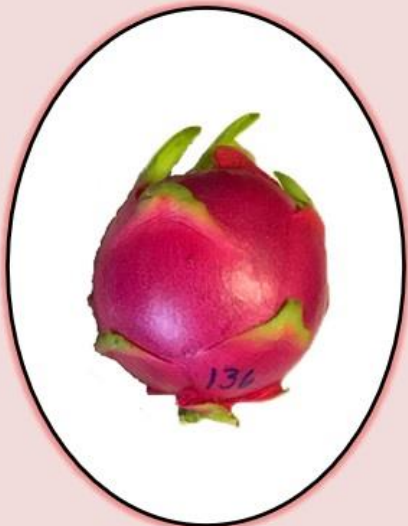


Característica	Descripción	Unidad
Forma	Mayormente espada	**Escala B/L
Densidad en fruto	18	
Densidad estomática	2.94	No. Estomas por campo

Pulpa y Cáscara



PULPA		
Característica	Descripción	Unidad
Color	73.31/10.11/97.55	LCH
SST	13.1	°Brix
SST/AT	57.68	
[Bc]	0.057	mg 100 g ⁻¹ pulpa
[Bx]	0.048	mg 100 g ⁻¹ pulpa
VitC	25.93	µg ml ⁻¹
FT	30	mg L ⁻¹ ácido gálico
CA	8.40	% RSC
CÁSCARA		
Color	53.97/9/51.21	LCH
Dens. Estomática	4.54	



CP-136

Fruto

Característica	Descripción	Unidad
Peso promedio	389.70	gramos
% Pérdida de peso	7.30	%
Forma	Redondo	*Escala DE/DP
Rel. Pulpa/Cáscara	82.56	%

Brácteas



Característica	Descripción	Unidad
Forma	Triangular	**Escala B/L
Densidad en fruto	16	
Densidad estomática	3.61	No. Estomas por campo estomática

Pulpa y Cáscara



PULPA		
Característica	Descripción	Unidad
Color	71.70/8.82/110.95	LCH
SST	12.5	°Brix
SST/AT	59.52	
[Bc]	0.044	mg 100 g ⁻¹ pulpa
[Bx]	0.047	mg 100 g ⁻¹ pulpa
VitC	32.22	µg ml ⁻¹
FT	36	mg L ⁻¹ ácido gálico
CA	8.18	% RSC
CÁSCARA		
Color	59.28/2.62/52.89	LCH
Dens. Estomática	4.33	



CP-300

Fruto

Característica	Descripción	Unidad
Peso promedio	355.19	gramos
% Pérdida de peso	5.66	%
Forma	Ovalado	*Escala DE/DP
Rel. Pulpa/Cáscara	72.08	%

Brácteas



Característica	Descripción	Unidad
Forma	Espada	**Escala B/L
Densidad en fruto	31	
Densidad estomática	2.78	No. Estomas por campo

Pulpa y Cáscara



PULPA		
Característica	Descripción	Unidad
Color	23.73/38.33/5.36	LCH
SST	15	°Brix
SST/AT	61.14	
[Bc]	15.8	mg 100 g ⁻¹ pulpa
[Bx]	5.79	mg 100 g ⁻¹ pulpa
VitC	63.96	µg ml ⁻¹
FT	49.56	mg L ⁻¹ ácido gálico
CA	36.52	% RSC
CÁSCARA		
Color	66.63/9.79/51.94	LCH
Dens. Estomática	3.41	



CP-178

Fruto

Característica	Descripción	Unidad
Peso promedio	469.70	gramos
% Pérdida de peso	7.59	%
Forma	Ovalado	*Escala DE/DP
Rel. Pulpa/Cáscara	72.33	%

Brácteas



Característica	Descripción	Unidad
Forma	Mayormente espada	**Escala B/L
Densidad en fruto	29	
Densidad estomática	6.22	No. Estomas por campo

Pulpa y Cáscara



PULPA		
Característica	Descripción	Unidad
Color	27.31/36.68/13.43	LCH
SST	15.9	°Brix
SST/AT	50.07	
[Bc]	19.63	mg 100 g ⁻¹ pulpa
[Bx]	6.15	mg 100 g ⁻¹ pulpa
VitC	102.64	µg ml ⁻¹
FT	71.56	mg L ⁻¹ ácido gálico
CA	52.94	% RSC
CÁSCARA		
Color	51.61/15.01/53.62	LCH
Dens. Estomática	5.37	



CP-169

Fruto

Característica	Descripción	Unidad
Peso promedio	242.06	gramos
% Pérdida de peso	8.01	%
Forma	Redondo	*Escala DE/DP
Rel. Pulpa/Cáscara	74.36	%

Brácteas



Característica	Descripción	Unidad
Forma	Mayormente triangular	**Escala B/L
Densidad en fruto	20	
Densidad estomática	4.06	No. Estomas por campo

Pulpa y Cáscara



PULPA		
Característica	Descripción	Unidad
Color	27.10/40.45/352.17	LCH
SST	14.6	°Brix
SST/AT	35.52	
[Bc]	7.29	mg 100 g ⁻¹ pulpa
[Bx]	2.5	mg 100 g ⁻¹ pulpa
VitC	43.18	µg ml ⁻¹
FT	44.44	mg L ⁻¹ ácido gálico
CA	16.08	% RSC
CÁSCARA		
Color	62.6/10.69/52.93	LCH
Dens. Estomática	4.11	



CP-128

Fruto

Característica	Descripción	Unidad
Peso promedio	330.90	gramos
% Pérdida de peso	7.85	%
Forma	Redondo	*Escala DE/DP
Rel. Pulpa/Cáscara	86.06	%

Brácteas



Característica	Descripción	Unidad
Forma	Triangular	**Escala B/L
Densidad en fruto	20	
Densidad estomática	3.22	No. Estomas por campo

Pulpa y Cáscara



PULPA		
Característica	Descripción	Unidad
Color	30.93/40.2/352.07	LCH
SST	14.5	°Brix
SST/AT	36.44	
[Bc]	6.61	mg 100 g ⁻¹ pulpa
[Bx]	2.40	mg 100 g ⁻¹ pulpa
VitC	44.57	µg ml ⁻¹
FT	34.67	mg L ⁻¹ ácido gálico
CA	23.23	% RSC
CÁSCARA		
Color	58.3/9.29/44.79	LCH
Dens. Estomática	4.41	



CP-203

Fruto

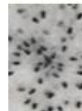
Característica	Descripción	Unidad
Peso promedio	393.67	gramos
% Pérdida de peso	9.76	%
Forma	Ovalado	*Escala DE/DP
Rel. Pulpa/Cáscara	87.05	%

Brácteas



Característica	Descripción	Unidad
Forma	Mayormente espada	**Escala B/L
Densidad en fruto	21	
Densidad estomática	7.22	No. Estomas por campo

Pulpa y Cáscara



PULPA		
Característica	Descripción	Unidad
Color	85.08/9.5/111	LCH
SST	13	°Brix
SST/AT	57.73	
[Bc]	0.285	mg 100 g ⁻¹ pulpa
[Bx]	0.229	mg 100 g ⁻¹ pulpa
VitC	25.92	µg ml ⁻¹
FT	24.89	mg L ⁻¹ ácido gálico
CA	8.92	% RSC
CÁSCARA		
Color	86/109/72	LCH
Dens. Estomática	6.7	



CP-195

Fruto

Característica	Descripción	Unidad
Peso promedio	278.77	gramos
% Pérdida de peso	9.51	%
Forma	Alargado	*Escala DE/DP
Rel. Pulpa/Cáscara	72.59	%

Brácteas



Característica	Descripción	Unidad
Forma	Mayormente espada	**Escala B/L
Densidad en fruto	20	
Densidad estomática	6.50	No. Estomas por campo

Pulpa y Cáscara



PULPA		
Característica	Descripción	Unidad
Color	82.71/9.58/111.37	LCH
SST	14	°Brix
SST/AT	53.95	
[Bc]	0.136	mg 100 g ⁻¹ pulpa
[Bx]	0.042	mg 100 g ⁻¹ pulpa
VitC	33.61	µg ml ⁻¹
FT	27.78	mg L ⁻¹ ácido gálico
CA	6.29	% RSC
CÁSCARA		
Color	89/110/59	LCH
Dens. Estomática	5.78	



CP-182

Fruto

Característica	Descripción	Unidad
Peso promedio	348.08	gramos
% Pérdida de peso	6.44	%
Forma	Alargado	*Escala DE/DP
Rel. Pulpa/Cáscara	77.97	%

Brácteas



Característica	Descripción	Unidad
Forma	Mayormente triangular	**Escala B/L
Densidad en fruto	15	
Densidad estomática	1.67	No. Estomas por campo

Pulpa y Cáscara



PULPA		
Característica	Descripción	Unidad
Color	80.80/9.42/111.47	LCH
SST	14.1	°Brix
SST/AT	51.95	
[Bc]	0.177	mg 100 g ⁻¹ pulpa
[Bx]	0.0	mg 100 g ⁻¹ pulpa
VitC	33.53	µg ml ⁻¹
FT	30	mg L ⁻¹ ácido gálico
CA	8.55	% RSC
CÁSCARA		
Color	89/110/63	LCH
Dens. Estomática	3.48	