

## Caracterización genética, química y agronómica de líneas avanzadas de tomate de cáscara<sup>1</sup>

### Genetic, chemical and agronomical characterization of husk tomato advanced lines

Mario Martín González-Chavira<sup>2</sup>, Salvador Horacio Guzmán-Maldonado<sup>2</sup>, José Luis Pons-Hernández<sup>2</sup>,  
Salvador Villalobos-Reyes<sup>2</sup>, Enrique González-Pérez<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Recibido: 27 de agosto, 2018. Aceptado: 16 de octubre, 2018. Este trabajo formó parte del proyecto de investigación “Tecnología de producción orgánica, mejoramiento genético y conservación del germoplasma hortícola” y fue realizado en el Campo Experimental Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.
- <sup>2</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío. Carretera Celaya-San Miguel de Allende km 6.5, Colonia Roque, Celaya, Guanajuato, México. C. P. 38110. [gonzalez.mario@inifap.gob.mx](mailto:gonzalez.mario@inifap.gob.mx), [guzman.horacio@inifap.gob.mx](mailto:guzman.horacio@inifap.gob.mx), [pons.joseluis@inifap.gob.mx](mailto:pons.joseluis@inifap.gob.mx), [villalobos.salvador@inifap.gob.mx](mailto:villalobos.salvador@inifap.gob.mx), [gonzalez.enrique@inifap.gob.mx](mailto:gonzalez.enrique@inifap.gob.mx) (autor para correspondencia, <http://orcid.org/0000-0002-6648-1113>).

### Resumen

**Introducción.** Conocer la diversidad a nivel genético, químico y morfológico que existe entre individuos y poblaciones, es de gran utilidad en los programas de mejoramiento genético, ya que facilita la organización del material y la selección adecuada de genotipos superiores para el desarrollo de una población mejorada. **Objetivo.** El objetivo del presente trabajo fue caracterizar genética, química y agronómicamente líneas avanzadas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.), del programa de mejoramiento de hortalizas del Campo Experimental Bajío (CE-Bajío) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), México. **Materiales y métodos.** Durante la temporada primavera-verano y otoño-invierno de 2017, se cuantificó la variabilidad genética con marcadores moleculares de ADN de tipo AFLP (Amplified Fragment Length Polymorphism); se determinaron los compuestos fenólicos y tomatidina en fruto, y en lo agronómico el porcentaje de germinación, número de frutos por planta, peso del fruto, diámetro ecuatorial y polar, y el rendimiento. **Resultados.** Se obtuvo un promedio general de similitud entre los genotipos de 0,86. De acuerdo con las relaciones genéticas, se detectaron las líneas 4 y 70 como posibles progenitores de híbridos y un patrón geográfico en los agrupamientos. La diversidad química indicó que el mayor contenido de flavonoides (51,1 mg EAG/100 g) se presentó en la L-86, de fenoles y antocianinas (396, 8 y 7,22 mg EAG/100 g, resp.) en la L-182, y de taninos (188,4 mg EAG/100 g) en la L-97, mientras que la tomatidina fue mayor en frutos verdes (2,23-3,81 mg EAG/100 g) que en morados. El intervalo de rendimiento de las líneas fue de 11,4 a 47,6 t/ha, donde el 20% de las líneas superaron la media de rendimiento nacional (40 t/ha). Se destacó la L-37 con 47,6 t/ha, que además produjo mayor número de frutos por planta, diámetro ecuatorial y polar, y una tasa de germinación de 93,3%. **Conclusión.** Las líneas 37, 25, 27 y 167, tienen potencial para ser validadas para uso comercial y como líneas parentales.

**Palabras clave:** compuestos funcionales, diversidad genética, marcadores moleculares, *Physalis ixocarpa*, producción potencial.

### Abstract

**Introduction.** Knowledge about the genetic, chemical and morphological diversity that exists between individuals and populations is very useful in breeding programs, because it facilitates the organization of the material and the



appropriate selection of superior genotypes for the development of an improved population. **Objective.** The aim of this research was to make a genetic, chemical and agronomic characterization in twenty advanced husk tomato lines (*Physalis ixocarpa* Brot.), belonging to the vegetable breeding program of the Campo Experimental Bajío (CE-Bajío), of the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), México. **Materials and methods.** During the spring-summer and autumn-winter 2017, the genetic variability was quantified with molecular markers of DNA, type AFLP (Amplified Fragment Length Polymorphisms), likewise, the phenolic and tomatidine compounds in the fruit were determined, and agronomic traits like germination percentage, number of fruits per plant, weight of the fruit, equatorial and polar diameter per fruit, and fruit yield were determined. A general average of similarity between the genotypes of 0.86 was obtained. **Results.** A general similitude mean between genotypes of 0.86 was obtained. According to the genetic relationships, a geographic pattern was identified and genotypes 4 and 70 were detected as possible progenitors of improved hybrids. Chemical diversity indicated that the fruits flavonoids content in L-86 was the highest (51.1mg EAG/100g), phenols (396.8 mg EAG/100 g) and anthocyanin's (7.22 mg EAG/100g) for L-182 and tannins (188.4 mg EAG/100 g) for L-97, while tomatidine (2.23-3.81 mg EAG/100 g) was higher in green fruits than purple fruits. The agronomic results indicate that the lines fruit yield ranged from 11.4 to 47.6 t/ha, the 20% of the lines has a superior yield than the national mean yield (40 t/ha), The L-37 was noticeable, since it has the highest fruit yield with 47.6 t/ha, and has the highest number of fruits number per plant, equatorial and polar diameters, and germination rate (93.3%). **Conclusion.** Based on the results the lines 37, 25, 27 and 167 are positioned as lines with potential for commercial use and as parental lines.

**Keywords:** functional components, genetic diversity, molecular markers, *Physalis ixocarpa*, production potential.

## Introducción

El cultivo de tomate verde o de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en la región centro de México es de importancia económica y cultural. Ocupa el quinto lugar en cuanto a superficie sembrada a nivel nacional, con un promedio de producción entre 2013-2016 de 637 462 toneladas anuales; producidas en 42 000 ha. Esto ha situado a México en el noveno lugar como productor y en el tercer puesto como exportador (SAGARPA, 2017).

En México se han reportado más de setenta especies de *Physalis*, de las cuales la especie más cultivada es *Physalis ixocarpa* Brot., de la cual se reconocen ocho razas y de la que se han derivado variedades comerciales (Peña-Lomelí et al., 1998), por medio de la selección masal, familiar de medios hermanos y combinada de medios hermanos, debido a que el tomate es una planta alógama obligada que presenta autoincompatibilidad gametofítica (Zamora-Tavares et al., 2015). Las principales características de interés agronómico y que los mejoradores utilizan para la generación de variedades son: la altura a la primera bifurcación, el tamaño de fruto, peso individual del fruto, diámetro polar y ecuatorial, caracteres que inciden directamente en el rendimiento (Santiaguillo-Hernández et al., 2004; Peña-Lomelí et al., 2013; Camposeco Montejo et al., 2015), así como el color, forma y firmeza del fruto (Peña-Lomelí et al., 2014). Además, otro factor que se considera es la resistencia a plagas y patógenos, especialmente el barrenador del tallo y la cenicilla; y más recientemente, el mejoramiento genético del tomate de cáscara, se ha enfocado en el incremento del contenido de compuestos funcionales como la tomatidina, entre otros (Valdivia-Mares et al., 2016).

En las últimas décadas, se han realizado innumerables esfuerzos por complementar la caracterización fenotípica con base en técnicas que permitan conocer más directamente la variación genética y no solo a través de los fenotipos. Esto ha provocado un notorio aumento en los trabajos que consideran análisis químicos y el uso de los marcadores moleculares para estudios de diversidad. Los marcadores moleculares proveen gran cantidad de información, son altamente polimórficos, cubren todo el genoma y su evaluación es posible en estadios muy tempranos del desarrollo, utilizando pequeñas porciones de material biológico sin destruir el individuo; no presentan interacciones intergénicas, tienen mayor reproducibilidad, presentan herencia simple y a menudo codominancia

(Awise, 2004). Permiten estimar la diversidad genética neutral, hacer comparaciones entre individuos, poblaciones (también variedades o razas) y especies o grupos taxonómicos mayores, y establecen relaciones de paternidad, parentesco y filogenéticas. Entre los más usados para caracterizar y evaluar la variabilidad genética se encuentran los AFLP (polimorfismos en la longitud de los fragmentos amplificados, por sus siglas en inglés) (Cubero, 2013).

Desde el punto de vista químico-nutricional, el tomate de cáscara es de gran interés, ya que contiene 11% de proteína, 18% grasa y 5% de fibra (Bock et al., 1995). Sin embargo, se ha estudiado poco la calidad nutracéutica de esta especie. Por ejemplo, se evaluó la capacidad antioxidante de la raíz, hoja, flor y fruto, y se encontró que el fruto presenta una mayor capacidad antioxidante que el resto de las estructuras de la planta (Bergier et al., 2012). Autores han reportado sobre el contenido de fenoles totales en el fruto, que fue menor ( $2 \mu\text{mol/g}$ ) que en flor ( $18 \mu\text{mol/g}$ ), hojas ( $16 \mu\text{mol/g}$ ) y raíces ( $13 \mu\text{mol/g}$ ) (Bergier et al., 2012). Sin embargo, el tomate de cáscara no es una buena fuente de  $\beta$ -caroteno y luteína, tanto fresco como cocido (Elizalde-González y Hernández-Ogarcía, 2007). La tomatina o tomatidina (en su forma desglucosilada) es un glico-alcaloide que presenta efecto anti-fúngico, antimicrobiano y repelente a insectos y herbívoros en la planta. Sin embargo, también se le han atribuido diversos beneficios sobre la salud, como la disminución del colesterol en la sangre, debido a la propiedad que tiene el colesterol de acoplarse con la tomatina (Friedman, 2013), como se observó en ratas suplementadas con tomatidina (0,04%), en las que el nivel de colesterol y la aterosclerosis se redujo después de diez días (Fujiwara et al., 2012). A la fecha, no se ha reportado que el consumo moderado de este alcaloide presente efectos tóxicos en los humanos (Andersson, 1999).

El objetivo del presente trabajo fue caracterizar genética, química y agrónomicamente líneas avanzadas de tomate de cáscara del programa de mejoramiento de hortalizas del Campo Experimental Bajío (CE-Bajío), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), México.

## Materiales y métodos

El estudio fue desarrollado en las instalaciones del Campo Experimental Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), localizado en Celaya, Guanajuato, México, en las coordenadas geográficas  $20^{\circ} 32' 05''$  LN y  $100^{\circ} 48' 49''$  LO, a 1750 msnm, durante la temporada primavera-verano (PV) y otoño-invierno (OI) de 2017, bajo condiciones de temperatura media de  $29,4^{\circ}\text{C}$  en PV y  $21,2^{\circ}\text{C}$  en OI, precipitación media de 480 mm en PV y 25 mm en OI, humedad relativa promedio de 62% en PV y 38% en OI, y evapotranspiración media de 320 mm en PV y 240 mm en OI. El lote experimental utilizado fue de  $500 \text{ m}^2$  con suelo franco arcilloso, con pH de 8,5 y conductividad eléctrica de 0,9 dS/m. El manejo del cultivo se realizó de acuerdo con el paquete tecnológico de producción desarrollado en el programa de hortalizas del INIFAP (Canul-Ku et al., 2017), con una densidad de plantación de 22 000 plantas/ha.

### Germoplasma

El germoplasma de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) tuvo diferentes procedencias (Cuadro 1). Las líneas fueron obtenidas a partir de individuos sobresalientes de poblaciones locales.

### Caracterización molecular

Para la obtención del tejido vegetal, se colectaron hojas jóvenes de cinco plantas de cada una de las veinte líneas avanzadas de tomate. Se realizaron extracciones individuales por planta. Posteriormente, se mezclaron cantidades iguales de ADN de cada planta para tener una sola muestra por cada línea. El aislamiento del ADN fue

**Cuadro 1.** Origen de las líneas avanzadas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) evaluadas en el ciclo primavera-verano y otoño-invierno, 2017. Celaya, Gto., México.

**Table 1.** Origin of the advanced husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) lines evaluated in the spring-summer and autumn winter cycle, 2017. Celaya, Gto., Mexico.

| Accesión           | Estado   | Localidad <sup>†</sup>  | Latitud <sup>‡</sup> | Longitud   | Altitud (msnm) | C |
|--------------------|----------|-------------------------|----------------------|------------|----------------|---|
| L-4                | Guerrero | Tuxpan                  | 18°19'45"            | 99°28'27"  | 823            | M |
| L-17               | Guerrero | Tuxpan, Guerrero        | 18°19'45"            | 99°28'27"  | 823            | M |
| L-18               | Guerrero | Tlapa de Comonfort      | 17°33'04"            | 98°33'58"  | 1036           | M |
| L-25               | Puebla   | San Salvador el Verde   | 19°16'21"            | 98°31'7.1" | 2302           | V |
| L-27               | Puebla   | Santa Cruz Analco       | 19°15'56"            | 98°30'15"  | 2302           | V |
| L-30               | Puebla   | San Matías Tlalancaleca | 19°19'42"            | 98°29'42"  | 2400           | V |
| L-37               | Puebla   | San Lucas el Grande     | 19°18'24"            | 98°28'52"  | 2315           | V |
| L-41               | Jalisco  | Ixtlahuaca del Río      | 20°49'14"            | 103°08'09" | 1718           | M |
| L-64               | Jalisco  | Ixtlahuaca del Río      | 20°49'14"            | 103°08'09" | 1718           | V |
| L-70               | Jalisco  | San Miguel Cuyutlán     | 20°27'43"            | 103°27'11" | 1588           | V |
| L-79               | Jalisco  | San Miguel Cuyutlán     | 20°27'43"            | 103°27'11" | 1588           | V |
| L-86               | Morelos  | Cuatla                  | 18°48'14"            | 98°58'10"  | 1273           | V |
| L-88               | Morelos  | Cuatla                  | 18°47'51"            | 98°58'22"  | 1264           | V |
| L-89               | Morelos  | Cuatla                  | 18°47'32"            | 98°58'39"  | 1253           | V |
| L-92               | Morelos  | Tetelcingo              | 18°52'09"            | 98°56'01'  | 1421           | V |
| L-94               | Morelos  | Tetelcingo              | 18°52'08"            | 98°55'58"  | 1423           | V |
| L-97               | Morelos  | Tetelcingo              | 18°52'06"            | 98°55'57"  | 1422           | V |
| L-167              | Morelos  | Jojutla                 | 18°36'53"            | 99°11'28"  | 900            | M |
| L-171              | Morelos  | Jojutla                 | 18°37'17"            | 99°11'34"  | 901            | M |
| L-182 <sup>#</sup> | Morelos  | Totolapan               | 18°58'38"            | 98°55'47"  | 1900           | V |

<sup>†</sup>Lugar donde se colectó el material original / Place where the original material was collected.

<sup>‡</sup>Coordenadas geográficas estimadas con base en el lugar de colecta / Geographical coordinates estimated based on the place of collection.

<sup>#</sup>Variedad comercial / commercial variety.

C= color del fruto / Fruit color; V= verde, M= morado / V= green, M= purple.

hecho de acuerdo con el protocolo de extracción de CTAB modificado por Porebski et al. (1997). Se cuantificó con la ayuda de un espectrofotómetro (NanoDrop 8000) y se complementó con una cuantificación visual en gel de agarosa a 1,5%. Se uniformizaron las diluciones a una concentración de 120 ng/μl de ADN.

Los polimorfismos en la longitud de los fragmentos amplificados se detectaron con base en el protocolo descrito por Vos et al. (1995), que en términos generales consiste en: cortar el ADN con dos endonucleasas de restricción, una de corte raro y otra de corte frecuente (Eco R1 y Tru 91). Los productos de estas digestiones se ligan a secuencias conocidas de ADN de doble cadena llamadas adaptadores, la secuencia adaptador-sitio de restricción de estos fragmentos sirve como ADN blanco para las posteriores amplificaciones. Se hace una amplificación selectiva con iniciadores AFLP que tienen en su extremo 3' un número de bases selectivas (1 y 3) que se extienden hacia dentro del fragmento de restricción, uno de estos iniciadores se marca con fluoróforos que emiten luz en una longitud de onda de 700 y 800 nm y son detectados por un escáner láser que los registra, de esta forma, solo un subgrupo de fragmentos de restricción será amplificado y visualizado en geles de secuenciación de poliacrilamida bajo condiciones desnaturizantes, con el empleo de un secuenciador NEN Global IR2, que además permite la captura automática de la imagen digital.

Los iniciadores adaptador-sitio de restricción Eco R1 (E+3) usados en este trabajo fueron: E+ACA, E+AGC y E+AAC; los iniciadores adaptador-sitio de restricción Tru 91 (T+3) fueron T+CAG y T+CTC. Con estos iniciadores se formaron las cuatro combinaciones usadas para el análisis: E+ACA/T+CAG, E+AGC/T+CAG, E+ACA/T+CTC y E+AAC/T+CTC.

Las imágenes digitales generadas por el secuenciador, se analizaron con el empleo del programa “Cross Checker 2.91”, el cual codifica las bandas de cada variedad usando un código binario, donde cada banda se representa como presente (1) o ausente (0), los archivos de datos binarios fueron analizados con el programa NTSYS-pc versión 2.1 (Numerical Taxonomy Multivariate Analysis System) (Rohlf, 2000), para generar una matriz de similitud basada en el coeficiente DICE (Núñez-Colín y Valadez-Moctezuma, 2010), el cual considera para determinar la semejanza entre dos variedades solo las coincidencias. A partir de la matriz de similitud, se determinaron las relaciones genéticas entre el germoplasma estudiado, utilizando un dendrograma generado por un análisis de agrupamientos aplicando el método UPGMA (Unweighted Pair Group Method Arithmetic Average).

### Caracterización química

De las muestras de frutos colectados, se seleccionaron catorce líneas (Cuadro 2). Seis líneas no se consideraron para esta caracterización, debido a que tenían características físicas similares con otras líneas que provenían de la misma región geográfica (líneas 4, 18, 27, 64, 88 y 92; Cuadro 1). En cuatro frutos por línea se llevó a cabo la determinación de flavonoides por el método de Dewanto et al. (2002), fenoles totales se cuantificaron por la técnica propuesta por Singleton et al. (1999), con el empleo del reactivo de Folin-Ciocalteu. El contenido de fenoles totales se expresó como mg equivalentes de ácido gálico por 100 g de muestra seca (bs). Las antocianinas se determinaron

**Cuadro 2.** Contenido de compuestos fenólicos y tomatidina en líneas avanzadas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). Celaya, Gto., México. 2017.

**Table 2.** Content of phenolic compounds and tomatidine in advanced husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) lines. Celaya, Gto., Mexico. 2017.

| Línea | Flavonoides mg<br>EAG/100 g | Fenoles totales<br>(EAGmg/100 g) | Taninos<br>(mgEC/100 g) | Antocianinas<br>(EC3Gmg/100 g) | Tomatidina<br>(mg-100 g) |
|-------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| L-17  | †34,7±0,12 e                | 209,4±6,3 g                      | 149,0±0,04 c            | 2,92±0,17 f                    | 3,26±0,04 b              |
| L-25  | 33,8±0,76 e                 | 360,6±1,74 b                     | 33,1±1,99 fg            | 5,49±0,11 b                    | 3,26±0,04 b              |
| L-30  | 35,1±3,16 ef                | 292,4±1,85 d                     | 29,7±1,92 h             | 4,40±0,04 d                    | 3,75±0,01 a              |
| L-37  | 41,2±0,24 c                 | 365,6±3,98 b                     | 12,6±0,08 i             | 5,59±0,13 b                    | 2,59±0,07 d              |
| L-41  | 29,7±0,19 f                 | 249,7±11,8 f                     | 124,6±0,89 d            | 2,87±0,16 f                    | 2,49±0,07 d              |
| L-70  | 34,16±1,21 e                | 383,2±7,1 a                      | 161,7±1,08 b            | 5,17±0,71 b                    | 3,06±0,15 c              |
| L-79  | 39,19±2,45 cd               | 239,9±11,5 f                     | 149,6±0,66 c            | 2,92±0,19 f                    | 3,81±0,19 a              |
| L-86  | 51,17±1,27 b                | 297,9±5,59 d                     | 34,5±1,40 f             | 2,53±0,36 f                    | 3,78±0,09 a              |
| L-89  | 37,6±3,09 de                | 335,8±7,64 c                     | 32,2±0,89 gh            | 4,81±0,12 c                    | 2,23±0,03 e              |
| L-94  | 34,02±0,14 e                | 260,6±7,5 e                      | 138,1±0,03 d            | 2,71±0,27 f                    | 3,65±0,11 a              |
| L-97  | 40,84±2,99 c                | 320,6±3,3 c                      | 188,4±1,31 a            | 4,59±0,25 c                    | 2,26±0,03 e              |
| L-167 | 30,5±1,59 f                 | 251,9±1,81 ef                    | 33,9±0,42 fg            | 3,18±0,03 e                    | 3,12±0,06 c              |
| L-171 | 17,14±0,71 g                | 324,4±7,67 c                     | 12,2±0,27 i             | 4,80±0,13 c                    | 3,04±0,05 c              |
| L-182 | 61,23±0,43 a                | 396,8±7,25 a                     | 78,6±1,84 e             | 7,22±0,06 a                    | 3,74±0,03 a              |

EAG= Equivalentes de ácido gálico, EC= Equivalentes de catequina, EC3G= Equivalentes de cianidina 3-glucósido / EAG= Galic acid equivalents, EC= Equivalentents of catechin, EC3G= Equivalentents of cyanidin 3-glucoside.

†Medias con la misma literal dentro de la columna son estadísticamente iguales (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) / Means with the same literal within the column are statistically equal (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

de acuerdo con la técnica descrita por Lee et al. (2005) por diferencia de pH, y se expresaron como mg equivalentes de cianidina 3-glucósido por 100 g de muestra seca; los taninos se cuantificaron de acuerdo con la metodología descrita por Deshpande y Cheryan (1985) y se reportaron como mg equivalentes de (+)-catequina por 100 g de muestra. Finalmente, la tomatidina se determinó siguiendo el método de extracción sugerido por Laurila et al. (1999), pero con cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Se utilizó un estándar comercial de tomatidina (SIGMA) para identificar y calcular el contenido de este compuesto.

Los datos obtenidos de todos los compuestos químicos se analizaron por medio de un análisis de varianza y una comparación de medias por el método de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) con el programa estadístico SAS (SAS Institute, 2009).

### **Caracterización morfológica y determinación del potencial agronómico**

Para determinar el vigor de la semilla de cada línea, en laboratorio se realizó una prueba de germinación (PG) según lo establecido por la International Seed Testing Association (ISTA, 1995). En campo, en los dos ciclos evaluados (PV y OI), las veinte líneas se sembraron en lotes de 500 m<sup>2</sup> bajo un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones. Cada unidad experimental fue de 8,9 m<sup>2</sup> con diecinueve plantas (repetición). El número de frutos por planta (NFP), peso promedio del fruto (PPF), diámetro ecuatorial (DE), y diámetro polar (DP), se determinaron en el segundo corte como lo describieron Canul-Ku et al. (2017), y el rendimiento fue el acumulado de cinco cortes (R; t/ha), obtenido de multiplicar el rendimiento por planta por el número de plantas por m<sup>2</sup> por 10 000 m<sup>2</sup> (ha). Los datos obtenidos de las variables evaluadas se sometieron a un análisis de varianza y comparación de medias por Tukey ( $p \leq 0,05$ ), con el programa estadístico SAS (SAS Institute, 2009).

## **Resultados**

### **Caracterización molecular**

La media general de la similitud genética obtenida entre las veinte líneas de tomate de cáscara fue de 0,86, con un rango que varió desde 0,66 a 0,94. La mayor similitud fue entre las líneas 89 y 171, y la menor fue entre la 27 y 70 (Cuadro 3).

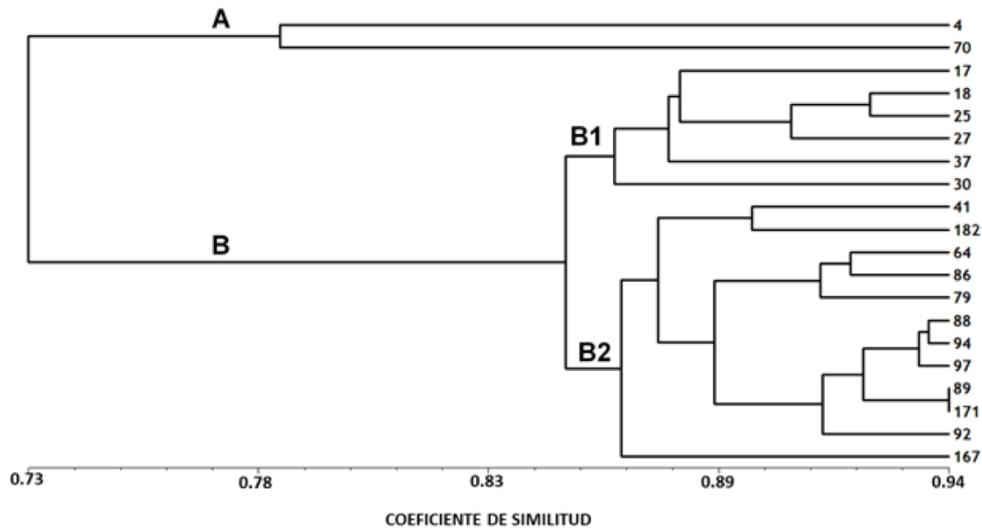
En las relaciones genéticas encontradas, se puede apreciar en el dendrograma (Figura 1), que a pesar de que el promedio general de similitud entre el total de las líneas fue alto, se formaron dos grupos (A y B), el A formado por las líneas 4 y 70, y el B con los dieciocho genotipos que completan este estudio. Los dos genotipos del grupo A, mostraron un coeficiente de similitud de 0,73 con respecto al resto de las líneas. Con respecto al grupo B, se apreció la formación de dos subgrupos (B1 y B2), en el subgrupo B2 se agruparon los genotipos 89 y 171, que por su alto índice de similitud de 94% podrían considerarse como duplicados (Figura 1). De igual forma, en este subgrupo B2, se tuvieron los materiales 88, 94 y 97, que fueron muy parecidos genéticamente a nivel molecular, morfológico y rendimientos estadísticamente iguales, por lo que, con base en estos criterios, podría considerarse su empleo indistintamente en los diferentes procesos de mejoramiento, y mezclarlos para ser usados como una variedad de polinización libre.

Al analizar el grupo B del dendrograma generado, se puede observar que existió una tendencia de separar los genotipos por su lugar de origen. En el grupo B1 se ubicaron todos los originarios de Puebla y dos de Guerrero y en el grupo B2 todos los materiales procedentes de Jalisco y Morelos. La formación de estos dos grupos podría señalar la presencia de dos fuentes de diversidad en este germoplasma, este agrupamiento, que correspondió a un patrón geográfico, indicó baja diseminación o flujo genético entre estas zonas.

**Cuadro 3.** Matriz de similitud genética entre genotipos de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.), según el coeficiente DICE, con marcadores AFLP. Celaya, Gto., México. 2017.

**Cuadro 3.** Matrix of genetic similarity between husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) genotypes, according to the DICE coefficient with AFLP markers. Celaya, Gto., Mexico. 2017.

| Geno-<br>tipos | 4    | 17   | 18   | 25   | 27   | 30   | 37   | 41   | 64   | 70   | 79   | 86   | 88   | 89   | 92   | 94   | 97   | 167  | 171  | 182 |  |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|--|
| 4              | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |  |
| 17             | 0,78 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |  |
| 18             | 0,73 | 0,89 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |  |
| 25             | 0,77 | 0,88 | 0,92 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |  |
| 27             | 0,73 | 0,86 | 0,92 | 0,88 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |  |
| 30             | 0,79 | 0,85 | 0,85 | 0,87 | 0,88 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |  |
| 37             | 0,76 | 0,87 | 0,87 | 0,89 | 0,87 | 0,87 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |  |
| 41             | 0,71 | 0,82 | 0,88 | 0,84 | 0,85 | 0,83 | 0,85 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |  |
| 64             | 0,74 | 0,82 | 0,84 | 0,84 | 0,83 | 0,84 | 0,85 | 0,86 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |  |
| 70             | 0,79 | 0,69 | 0,70 | 0,71 | 0,66 | 0,71 | 0,73 | 0,73 | 0,79 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |  |
| 79             | 0,72 | 0,83 | 0,89 | 0,85 | 0,85 | 0,82 | 0,85 | 0,89 | 0,90 | 0,79 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |     |  |
| 86             | 0,71 | 0,82 | 0,85 | 0,82 | 0,82 | 0,83 | 0,85 | 0,89 | 0,91 | 0,78 | 0,91 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |     |  |
| 88             | 0,72 | 0,87 | 0,90 | 0,86 | 0,85 | 0,83 | 0,90 | 0,88 | 0,88 | 0,74 | 0,91 | 0,87 | 1    |      |      |      |      |      |      |     |  |
| 89             | 0,74 | 0,83 | 0,90 | 0,88 | 0,85 | 0,86 | 0,87 | 0,89 | 0,89 | 0,75 | 0,89 | 0,88 | 0,92 | 1    |      |      |      |      |      |     |  |
| 92             | 0,73 | 0,84 | 0,87 | 0,85 | 0,85 | 0,88 | 0,85 | 0,88 | 0,88 | 0,75 | 0,90 | 0,89 | 0,89 | 0,91 | 1    |      |      |      |      |     |  |
| 94             | 0,71 | 0,87 | 0,92 | 0,88 | 0,85 | 0,83 | 0,87 | 0,88 | 0,85 | 0,75 | 0,91 | 0,87 | 0,93 | 0,91 | 0,92 | 1    |      |      |      |     |  |
| 97             | 0,72 | 0,85 | 0,93 | 0,86 | 0,88 | 0,84 | 0,88 | 0,88 | 0,89 | 0,73 | 0,91 | 0,87 | 0,93 | 0,93 | 0,90 | 0,93 | 1    |      |      |     |  |
| 167            | 0,73 | 0,80 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,84 | 0,85 | 0,86 | 0,84 | 0,73 | 0,86 | 0,82 | 0,88 | 0,88 | 0,87 | 0,85 | 0,86 | 1    |      |     |  |
| 171            | 0,76 | 0,84 | 0,89 | 0,89 | 0,85 | 0,86 | 0,88 | 0,86 | 0,89 | 0,75 | 0,89 | 0,85 | 0,93 | 0,94 | 0,92 | 0,91 | 0,91 | 0,93 | 1    |     |  |
| 182            | 0,70 | 0,80 | 0,87 | 0,82 | 0,84 | 0,79 | 0,81 | 0,89 | 0,83 | 0,70 | 0,86 | 0,86 | 0,88 | 0,88 | 0,86 | 0,88 | 0,86 | 0,87 | 0,87 | 1   |  |



**Figura 1.** Dendrograma de las relaciones genéticas existentes entre veinte líneas avanzadas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.), basado en el coeficiente DICE calculado con cuatro combinaciones AFLP. Celaya, Gto., México. 2017.

**Figure 1.** Dendrogram of existing genetic relationships between twenty advanced husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) lines, based on the DICE coefficient calculated with four AFLP combinations. Celaya, Gto., Mexico. 2017.

## Caracterización química

En relación con el contenido de compuestos fenólicos en las líneas de tomate de cáscara, se determinó que este fruto es una buena fuente de fenoles totales (209,4 – 396,8 mg EAG/100 g). Con respecto a los taninos, hubo dos grupos de muestras; uno de alto contenido (124,6-188,4 mg EC/100 g) y el otro con contenidos por debajo de 78,6 mg EC/100 g (Cuadro 2). El contenido de flavonoides fue alto, pero se observó una muestra (L-171) con un tercio del contenido de la muestra más concentrada (L-182). El contenido de antocianinas fue muy bajo (2,53 – 7,22 mg EC3G/100 g). La tomatidina presente en las líneas evaluadas varió entre 2,23-3,81 mg/100 g, y registró los valores más altos en los tomates de color verde (Cuadro 2). Además, se detectaron líneas que presentaron bajo contenido de taninos y tomatidina, que son factores anti-nutricionales al formar complejos con minerales bajando su disponibilidad y compuestos tóxicos, respectivamente. El alto contenido de fenoles totales hace atractivas a varias líneas de tomate.

## Caracterización agronómica

En cuanto a la caracterización morfológica, cada línea evaluada presentó un comportamiento intrínseco, derivado de las características propias de cada material (Cuadro 4).

## Germinación

Hubo diferencias estadísticamente significativas para la prueba de germinación (PG), donde en todas las líneas se alcanzó la máxima germinación entre los seis y diez días. En la línea 182 se registró la mayor tasa de germinación con 96,5% y la menor en las líneas L4 y L18, ambas con 76,6%. El 55% de las líneas presentaron una tasa de germinación mayor al 90%, mientras que, seis líneas alcanzaron más del 80% y las restantes tres líneas menos del 70%.

## Caracteres morfológicos

Los caracteres morfológicos evaluados mostraron diferencias estadísticas ( $p \leq 0,05$ ). En lo referente al NFP, la L-30 produjo la mayor cantidad de frutos con 106,6 frutos por planta, seguida por la L-37 (84,6) y la L-41 (76), mientras que la L-182 (29,3) registró el menor NFP. Los frutos de mayor peso se registraron en la L-182 con frutos de 60,6 g en promedio, seguida de la L-171 (53,3 g), y las de menor peso se registraron en L-4, L-17 y L-41, con frutos de 14 g en promedio. El mayor DE se registró en frutos de las líneas L-182 (5,4), L-171 (4,9) y L-64 (4,7), y en las restantes el DE varió de 3,0 a 4,4 cm. El DP en todas las líneas estuvo entre 2,6 y 4,2, donde la L-171 registró el mayor DP. Existió una correlación positiva y significativa ( $p \leq 0,05$ ) entre el tamaño del fruto y su peso ( $r = 0,66^*$ ), y entre el NFP y el rendimiento ( $r = 0,55^*$ ), el cual es un indicador del rendimiento final. Los resultados indicaron que el 20% de las líneas superaron las 40 t/ha, donde la L-37 alcanzó el máximo rendimiento final con 47,6 t/ha y fue una de las líneas que mayor número de frutos produjo (Cuadro 4). El 40% de las líneas produjeron de 20,7 a 28,7 t/ha, el 25% de 35,0 a 38,8 t/ha y el restante 15% de 11,4 a 18,2 t/ha.

**Cuadro 4.** Variables de importancia agronómica determinadas en 20 líneas avanzadas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.), evaluadas en el ciclo primavera-verano y otoño-invierno, 2017. Celaya, Gto., México.

**Table 4.** Variables of agronomic importance determined in 20 advanced lines of husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) evaluated in the crop season spring-summer and autumn-winter, 2017. Celaya, Gto., Mexico.

| Línea | PG %               | NFP #                | PPF g     | DE cm            | DP cm   | R t/ha   | CF     |
|-------|--------------------|----------------------|-----------|------------------|---------|----------|--------|
| L-4   | 76,6h <sup>†</sup> | 38,6efg <sup>‡</sup> | 14,0g     | 3,1gh            | 2,6f    | 11,4d    | Morado |
| L-17  | 77,6gh             | 49,3cdefg            | 14,3g     | 3,1fgh           | 2,5f    | 16,3dc   | Morado |
| L-18  | 76,6h              | 44,6defg             | 18,7efg   | 3,4efgh          | 2,9def  | 18,2bcd  | Morado |
| L-25  | 88,5bcdef          | 68,8bcd              | 30,8cdefg | 4,2bcde          | 3,5bcd  | 41,9ab   | Verde  |
| L-27  | 85,7fg             | 60,6bcdef            | 32,2cdef  | 4,3cbd           | 3,1cdef | 41,5ab   | Verde  |
| L-30  | 88,1cdef           | 106,6a               | 16,0fg    | 3,3efgh          | 2,6ef   | 37,6abc  | Verde  |
| L-37  | 93,3abcd           | 84,6ab               | 26,5cdefg | 4,0cdefg         | 3,3bcde | 47,6a    | Verde  |
| L-41  | 91,6abcde          | 76,0bc               | 14,2g     | 3,0h             | 2,6ef   | 23,8abcd | Morado |
| L-64  | 93,5abc            | 39,3efg              | 42,8bc    | 4,7abc           | 3,6abc  | 36,6abc  | Verde  |
| L-70  | 92,6abcd           | 43,3defg             | 29,6cdefg | 4,1bcdef         | 3,4bcd  | 28,3abcd | Verde  |
| L-79  | 87,0def            | 30,0g                | 42,8bc    | 4,7abc           | 3,6abc  | 26,1abcd | Verde  |
| L-86  | 85,6efg            | 67,3bcde             | 18,7efg   | 3,4defgh         | 2,8def  | 28,1abcd | Verde  |
| L-88  | 90,1abcdef         | 62,6bcde             | 19,4efg   | 3,5defgh         | 2,9cdef | 25,0abcd | Verde  |
| L-89  | 88,3cdef           | 41,3defg             | 23,1defg  | 3,7defgh         | 3,0cdef | 20,7bcd  | Verde  |
| L-92  | 90,6abcdef         | 53,3cdefg            | 22,3efg   | 3,6defgh         | 3,0cdef | 25,7abcd | Verde  |
| L-94  | 92,2abcd           | 38,6efg              | 34,9cde   | 4,4bcd           | 3,3bcde | 28,7abcd | Verde  |
| L-97  | 92,3abcd           | 58,0bcdefg           | 28,4cdefg | 3,8cdefgh        | 3,1cdef | 35,0abcd | Verde  |
| L-167 | 94,8ab             | 56,0bcdefg           | 34,1cde   | 4,1bcde          | 3,3bcde | 40,7ab   | Morado |
| L-171 | 93,5abc            | 33,3fg               | 53,3ab    | 4,9ab            | 4,2a    | 38,8abc  | Morado |
| L-182 | 96,5a              | 29,3g                | 60,6a     | 5,4 <sup>a</sup> | 4,0ab   | 38,5abc  | Verde  |
| DMS   | 6,42               | 28,7                 | 16,9      | 0,9              | 0,7     | 24,1     |        |

<sup>†</sup>Medias con la misma literal dentro de la columna indican diferencias no significativas por Kruskal-Wallis test ( $p \leq 0,05$ ) / Means with the same literal within the column indicate non-significant differences by Kruskal-Wallis test ( $p \leq 0,05$ ).

<sup>‡</sup>Promedio obtenido de los dos ciclos evaluados en 2017 / Average obtained from the two cycles evaluated in 2017.

PG= porcentaje de germinación, NFP= número de frutos por planta, PPF= peso promedio del fruto, DE= diámetro ecuatorial, DP= diámetro polar, R= rendimiento, CF= color del fruto / PG= percentage of germination, NFP= number of fruits per plant, PPF= average fruit weight, DE= equatorial diameter, DP= polar diameter, R= yield, CF= fruit color.

## Discusión

### Caracterización molecular

Los resultados de similitud obtenidos fueron superiores al promedio de 0,62, reportado por Wei et al. (2012), obtenido al analizar 38 colectas de seis especies de *Physalis* con marcadores moleculares. Estas diferencias eran de esperarse por el tipo de genotipos analizados, ya que, se está comparando la similitud entre especies contra la similitud entre genotipos de la misma especie que, además, ha sufrido un proceso de mejoramiento.

Se ha sugerido que la domesticación y la endogamia reducen drásticamente la variación genética, y aumentan la similitud genética (Labate et al., 2009), no obstante, en tomate de cáscara parece que esta situación no es tan drástica. Con el empleo de marcadores moleculares, se analizaron tres poblaciones de *Physalis philadelphica* originarias del estado de Jalisco con diferentes grados de domesticación y hubo una similitud genética promedio en poblaciones silvestres de 0,84 y en cultivadas 0,83 (Zamora-Tavares et al., 2015), valores ligeramente inferiores a los encontrados en este trabajo en líneas mejoradas (0,86). Esto puede ser debido a que la mayoría de los genotipos de tomatillo poseen autoincompatibilidad gametofítica y por lo tanto, son alógamas obligadas (Evanno et al., 2005). Aunque el tomate de cáscara ha sido domesticado durante siglos, las formas silvestres con frecuencia se encuentran creciendo en campos cultivados, provocando cruzamientos entre ellos (Hudson, 1986), por lo que, la domesticación ha tenido poco efecto a nivel general en la diversidad de este cultivo. La diferencia con los resultados aquí presentados, es probable que se deba a que los genotipos analizados en este trabajo están en las etapas finales de mejoramiento, por lo que, la presión de selección hacia los caracteres de interés ha disminuido la diversidad genética y ha aumentado la similitud entre ellos.

Las relaciones genéticas encontradas en los dos genotipos del grupo A, mostraron un coeficiente de similitud de 0,73 con respecto al resto de las líneas, por lo que, resultaría interesante analizar su uso como posibles progenitores de híbridos, con el fin de aprovechar una potencial heterosis, la cual se ha demostrado que en esta especie es posible (Peña-Lomelí et al., 1998; Camposeco et al., 2015). Con respecto al grupo B, al analizar los datos morfológicos (Cuadro 2), se encontró que difieren significativamente en caracteres como peso, diámetro de fruto y rendimiento total; es común observar este tipo de incongruencias entre los análisis basados en datos morfológicos y en datos moleculares (Hillis y Wiens, 2000), sin descartar que estos conflictos puedan deberse a problemas metodológicos en ambos análisis. Se debe considerar el 6% de diferencias genéticas que existen entre los genomas analizados y la posibilidad de que genotipos similares puedan generar fenotipos diferentes por mecanismos epigenéticos (Masuelli y Marfil, 2011).

### Caracterización química

El bajo contenido de antocianinas no concuerda con el color morado del fruto de algunas muestras como es el caso de algunas frutas, entre ellas la zarzamora (243 mg EC3G/100 g), mora azul (486 mg EC3G/100 g) y vegetales como frijol común (15,9 mg EC3G/100 g), repollo rojo (80,0 mg EC3G/100 g) y cebolla roja (38,8 mg EC3G/100 g) (Wu et al., 2006). Sin embargo, debe tenerse presente que un color de este tipo no solo es el resultado de las antocianinas, sino de otros pigmentos como los carotenoides e inclusive de los taninos (Sedghi et al., 2012). Estos resultados muestran la amplia diversidad que se presenta en esta especie, con respecto al contenido de compuestos fenólicos. No es posible comparar el nivel de fenoles totales aquí mostrado con el reportado por Bergier et al. (2012) de 2  $\mu$ mol/g, debido a las diferentes unidades utilizadas por estos autores, aunque utilizaron la misma especie (*P. ixocarpa*). Sin embargo, González-Mendoza et al. (2011) reportaron menor contenido de fenoles totales (26,5-48,5 mg EC/100 g) que los aquí reportados. Las diferencias en el contenido de estos compuestos se deben a los diferentes materiales utilizados en este trabajo. Si se compara el contenido de fenoles totales con otras hortalizas, el contenido en esta especie fue mayor que en la calabaza roja (*Cucurbita máxima*) (158,4 mg EAG/100 g), brócoli (*Brassica oleracea*) (128,4 mg EAG/100 g), calabacita verde (*Cucurbita pepo*) (58 mg EAG/100 g) y jitomate (*Solanum lycopersicum*) (30 mg EAG/100 g) (Proteggente et al., 2002), por lo que, se podría considerar estas líneas como una fuente rica de fenoles. Con respecto a la tomatidina, las muestras analizadas presentaron niveles bajos de este compuesto, en comparación con lo reportado por Rick et al. (1994) para materiales sembrados en Perú (50-500 mg/100 g), por tanto, se requiere de fuentes con alto contenido de tomatidina para incorporar a las variedades experimentales y comerciales.

## Caracterización agronómica

La prueba de germinación indicó que el vigor de la semilla en la mayoría de las líneas superó el porcentaje de germinación mínimo (86%) establecido por las reglas de la ISTA (ISTA, 1995; Güemes y Inoue, 2001) y el periodo de germinación fue menor al doce días como reportaron Valdivia-Maresa et al. (2016), en cuatro especies de *Physalis* con tasas de germinación entre 70 y 90%. Estas diferencias son atribuibles a la constitución genética propia de cada línea y su capacidad para salir del periodo de dormancia (Robledo-Torres et al., 2011).

Al evaluar 220 materiales de tomate de cáscara en la variedad Puebla, se indicaron valores de peso individual de 84,5 g, diámetro polar de 4,5 cm y ecuatorial de 5,8 (Santiaguillo-Hernández et al., 2004), valores superiores a los obtenidos en las líneas evaluadas. En poblaciones de la variedad Rendidora se han reportado un peso promedio de fruto de 28,8 a 46,9 g y de 44,1 a 66,9 frutos/planta, con 3,9 a 4,6 cm en DE y de 3,9 a 4,1 cm en DP (Ramírez-Godina et al. 2013), valores similares a los obtenidos en este estudio. Por otro lado, el NFP y rendimiento obtenido en este estudio estuvo por debajo de lo indicado por Singh et al. (2014), que en un material de *Physalis ixocarpa* reportaron un promedio de 206,3 frutos/planta y un rendimiento de 54 t/ha, pero los valores de peso promedio de fruto (26,5 g), DP (2,7 cm) y DE (3,1 cm), semejantes a los encontrados en nuestro estudio. Cuando se evaluaron cuarenta variedades de tomate de cáscara, Peña-Lomelí et al. (2014) encontraron que la variedad Puebla SM2 produjo frutos de mayor tamaño (47,1 g) en el primer corte, con disminución en el tamaño en cortes subsecuentes, comportamiento que es normal en el tomate de cáscara. Al evaluar la variedad Rendidora, Mulato-Brito et al. (2007) observaron que esta alcanzó 38,7 t/ha en Chapingo, Edo. de México. El máximo rendimiento alcanzado en la L-37 concuerda con la variabilidad genética reconocida en tomate de cáscara, donde las variedades de la raza Puebla fueron las que alcanzaron mayores rendimientos, como lo indicaron Santiaguillo-Hernández (2004) y Peña-Lomelí (1997). Se puede alcanzar un rendimiento de hasta 56 t/ha cuando se cultiva tomate de cáscara en acolchado, y 24,4 t/ha en cultivo convencional (López-López et al., 2008).

## Conclusiones

La diversidad genética encontrada en los genotipos analizados se encuentra acorde a su condición genética de líneas avanzadas. El análisis con marcadores moleculares de tipo AFLP, permitió detectar posibles progenitores de híbridos y materiales con la uniformidad necesaria para generar variedades de polinización libre. Genotipos genéticamente muy similares difirieron significativamente en caracteres químicos y morfológicos. Los frutos de las líneas avanzadas mostraron ser una buena fuente de fenoles y taninos, mientras que, el contenido de tomatidina fue bajo. El 20% de las líneas (37, 25, 27 y 167) superaron la media nacional de rendimiento (40 t/ha), lo cual las posiciona como líneas con potencial para ser validadas para uso comercial y como líneas parentales.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el apoyo financiero otorgado y por las facilidades prestadas para la realización de esta investigación, mediante el proyecto “Tecnología de producción orgánica, mejoramiento genético y conservación de germoplasma hortícola”.

## Literatura citada

- Awise, J.C. 2004. Molecular markers. Natural history and evolution. Chapman & Hall, NY, USA.
- Andersson, C. 1999. Glycoalkaloids in tomatoes, eggplants, pepper and two *Solanum* species growing wild in the Nordic countries. Nordic Council of Ministers, Copenhagen, DEN.
- Bergier, K., E. Kuzniak, and M. Sklodowska. 2012. Antioxidant potential of Agrobacterium-transformed and non-transformed *Physalis ixocarpa* plants grown *in vitro* and *ex vitro*. Posteyy Hig. Med. Dosw. 66:976-982. doi:10.5604/17322693.1023086
- Bock, M.A., J. Sanchez-Pilcher, L.J. McKee, and M. Ortiz. 1995. Selected nutritional and quality analyses of tomatillos (*Physalis ixocarpa*). Plant Foods Hum. Nutr.48:127-133. doi:10.1007/BF01088308
- Canul-Ku, J., E. González-Pérez, S. Villalobos-Reyes, E. Javier Barrios-Gómez, y S.E. Rangel-Estrada. 2017. Valoración de germoplasma de tomate de cáscara cultivado en el estado de Morelos, México. Interciencia 42:250-255.
- Camposeco, M.N., T.V. Robledo, A.L.A. Valdez, G.F. Ramírez, V.R. Mendoza, y M.A. Benavides. 2015. Estimación de la aptitud combinatoria en poblaciones de tomate de cáscara. Rev. Mex. Cien. Agric. 6:437-451. doi:10.29312/remexca.v6i3.630
- Cubero, J.I. 2013. Introducción a la mejora genética vegetal. Mundi-Prensa, Madrid, ESP.
- Deshpande, S.S., and M. Cheryan. 1985. Evaluation of vanillin assay for tannin analysis of dry beans. J. Food Sci. 50:905-910. doi:10.1111/j.1365-2621.1985.tb12977.x
- Dewanto, X., K. Wu, K. Adom, and R.H. Liu. 2002. Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. J. Agric. Food Chem. 50:3010-3014. doi:10.1021/jf0115589
- Evanno, G., S. Regnaut, and J. Goudet. 2005. Detecting the number of clusters of individuals using the software STRUCTURE: a simulation study. Mol. Ecol. 14:2611-2620. doi:10.1111/j.1365-294X.2005.02553.x
- Elizalde-González, M.P., and S.G. Hernández-Ogarcía. 2007. Effect of cooking process on the contents of two bioactive carotenoids in *Solanum lycopersicum* tomatoes and *Physalis ixocarpa* and *Physalis philadelphica* tomatillos. Molecules 12:1829-1835. doi:10.3390/12081829
- Friedman, M. 2013. Anticarcinogenic, cardioprotective, and other health benefits of tomato compounds lycopene,  $\alpha$ -tomatine, and tomatidine in pure form and in fresh and processed tomatoes. J. Agric. Food. Chem. 61:9534-9550. doi:10.1021/jf402654e
- Fujiwara, Y., N. Kiyota, K. Tsurushima, M. Yoshitomi, H. Horlad, T. Ikeda, T. Nohara, M. Takeya, and R. Nagai. 2012. Tomatidine, a tomato sapogenol, ameliorates hyperlipidemia and atherosclerosis in apoE-deficient mice by inhibiting acyl-CoA: cholesterol acyl-transferase (ACAT). J. Agric. Food Chem. 60:2472-2479. doi:10.1021/jf204197r
- González-Mendoza, D., D. Ascencio-Martinez, A. Hau-Poox, V. Mendez-Trujillo, O. Grimaldo-Juarez, J.F. Santiaguillo-Hernández, L. Cervantes-Díaz, and S.M. Aviles-Marin. 2011. Phenolic compounds and physiochemical analysis of *Physalis ixocarpa* genotypes. Sci. Res. Essays 6:3808-3814. doi:10.5897/SRE11.570
- Güemes, G.M.J., y K. Inoue. 2001. Producción de semilla de alta calidad de tomate de cascara, variedad "Rendidora". COFUPRO, MEX. <https://www.cofupro.org.mx/cofupro/images/contenidoweb/indice/unidadmorelos/libros/hortalizas/hortalizas24.pdf> (consultado 28 set. 2018).
- Hillis, D.M., and J.J. Wiens. 2000. Molecules versus morphology in systematics. In: J.J. Wiens, editor, Phylogenetic analysis of morphological data. Smithsonian Institution Press, WA, USA. p. 1-19.

- Hudson, W.D. Jr. 1986. Relationships of domesticated and wild *Physalis philadelphica*. In: W.G. D'Arcy, editor, Solanaceae: biology and systematics. Columbia University Press, NY, USA. p. 416-432.
- ISTA (International Seed Testing Association). 1995. Handbook of vigor test methods. 3<sup>rd</sup> ed. Zurich, SUI.
- Labate, J.A., L.D. Robertson, and A.M. Baldo. 2009. Multilocus sequence data reveal extensive departures from equilibrium in domesticated tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Heredity* 103:257-267. doi:10.1038/hdy.2009.58
- Laurila, J., I. Laakso, T. Väänänen, P. Kuronen, R. Huopalahti, and E. Pehu. 1999. Determination of solanidine- and tomatidine-type glycoalkaloid aglycons by gas chromatography/mass spectrometry. *J. Agric. Food Chem.* 47:2738-2742. doi:10.1021/jf981009b
- Lee, J., R.W. Durst, and R.E. Wrolstad. 2005. Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study. *J. AOAC Int.* 88:1269-1278.
- López-López, R., R. Arteaga Ramírez, I. Sánchez-Cohen, W. Ojeda Bustamante, y V. González-Lauck. 2008. Evapotranspiration and crop water stress index in Mexican husk tomatoes (*Physalis ixocarpa* Brot). In: G. Gerosa, editor, Evapotranspiration - from measurements to agricultural and environmental applications. InTech, Rijeka, CRO. p. 187-210. doi:10.5772/17060
- Masuelli, R.W., y C.F. Marfil. 2011. Variabilidad epigenética en plantas y evolución. *J. Basic Appl. Genet.* 22(1):1-8.
- Mulato-Brito, J., and A. Peña-Lomelí. 2007. Germplasm evaluation of tomatillo (*Physalis ixocarpa* Brot.) cropped under Ontario, Canada and Chapingo, Mexico environmental conditions. *Veg. Crop Res. Bull.* 66:117-127. doi:10.2478/v10032-007-0014-8.
- Núñez-Colín, C.A., y E. Valadez-Moctezuma. 2010. Análisis estadístico de huellas genómicas. Un uso práctico de los paquetes computacionales más populares. INIFAP, Celaya, Guanajuato, MEX.
- Peña-Lomelí, A., H. Guerrero-Ramos, J.E. Rodríguez-Pérez, J. Sahagún-Castellanos, y N. Magaña-Lira. 2013. Selección temprana en familias de medios hermanos maternos de tomate de cáscara de la raza Puebla. *Rev. Chapingo Ser. Hort.* 19:5-13. doi:10.5154/r.rchsh.2012.01.18
- Peña-Lomelí, A., J.D. Molina-Galán, T. Cervantes-Santana, F. Márquez-Sánchez, J. Sahagún-Castellanos, y J. Ortiz-Cereceres. 1998. Heterosis intervarietal en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Rev. Chapingo Ser. Hort.* 4:31-37. doi:10.5154/r.rchsh.1997.12.093
- Peña-Lomelí, A., J.J. Ponce-Valerio, F. Sánchez-del-Castillo, y N. Magaña-Lira. 2014. Desempeño agronómico de variedades de tomate de cáscara en invernadero y campo abierto. *Rev. Fitotec. Mex.* 37:381-391.
- Porebski, S.L., G. Bailey, and R. Baum. 1997. Modification of CTAB DNA extraction protocol for plants containing high polysaccharide and polyphenol components. *Plant Mol. Biol. Rep.* 15:8-15. doi:10.1007/BF02772108.
- Proteggente, A.R., A.S. Pannala, G. Paganga, L. Van-Buren, E. Wagner, S. Wiseman, F. Van-de-Put, C. Dacombe, and C.A. Rice-Evans. 2002. The antioxidant activity of regular consumed fruit and vegetables reflects their phenolic and vitamin C composition. *Free Rad. Res.* 36:217-233. doi:10.1080/10715760290006484
- Ramírez-Godina, F., V. Robledo-Torres, R. Foroughbakhch-Pournabav, A. Benavides-Mendoza, J.L. Hernández-Piñero, M.H. Reyes-Valdes, and M.A. Alvarado-Vázquez. 2013. Yield and fruit quality evaluation in husk tomato autotetraploids (*Physalis ixocarpa*) and diploids. *Aust. J. Crop Sci.* 7:933-940.
- Rick, C.M., J.W. Uhlig, and A.D. Jones. 1994. High R-tomatine content in ripe fruit of Andean *Lycopersicon esculentum* var. cerasiforme: developmental and genetic aspects. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 91:12877-12881. doi:10.1073/pnas.91.26.12877
- Robledo-Torres, V., F. Ramírez-Godina, R. Foroughbakhch-Pournabav, A. Benavides-Mendoza, G. Hernández-Guzmán, and M.H. Reyes-Valdés. 2011. Development of tomatillo (*Physalis ixocarpa* Brot.) autotetraploids and their chromosome and phenotypic characterization. *Breed. Sci.* 61:288-293. doi:10.1270/jsbbs.61.288

- Rohlf, F.J. 2000. NTSYS-pc, numerical taxonomy and multivariate analysis system. Version 2.11. Exeter, Setauket, NY, USA.
- Santiaguillo-Hernández, J.F., y A. Peña-Lomelí. 1997. Tomate de cáscara: Elija su variedad. Rev. Agricultura 48:12-14.
- Santiaguillo-Hernández, F.J., T. Cervantes, y A. Peña-Lomelí. 2004. Selección para rendimiento y calidad de fruto de cruza planta × planta entre variedades de tomate de cáscara. Rev. Fitotec. Mex. 27:85-91.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Pesca). 2017. Anuario estadístico de la producción agrícola de México 2017. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (consultado 8 may. 2018).
- SAS Institute. 2009. SAS/SAT User's guide. Version 9. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Sedghi, M., A. Golian, P. Soleimani-Roodi, A. Ahmadi, and M. Aami-Azghadi. 2012. Relationship between color and tannin content in sorghum grain: application of image analysis and artificial neural network. Rev. Bras. Cienc. Avic. 14(1):57-62. doi:10.1590/S1516-635X2012000100010
- Singh, D.B., N. Ahmed, S. Lal, A. Mirza, O.C. Sharma, and A.A. Pal. 2014. Variation in growth, production and quality attributes of *Physalis* species under temperate ecosystem. Fruits 69:31-40. doi:10.1051/fruits/2013099
- Singleton, V.L., R. Orthofer, and R. M. Lamuela-Raventós. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. Methods Enzymol. 299:152-178. doi:10.1016/S0076-6879(99)99017-1
- Valdivia-Maresa, L.E., F.A. Rodríguez-Zaragoza, J. Sánchez-González, and O. Vargas-Ponce. 2016. Phenology, agronomic and nutritional potential of three wild husk tomato species (*Physalis*, *Solanaceae*) from Mexico. Sci. Hort. 200:83-94. doi:10.1016/j.scienta.2016.01.005
- Vos, P., R. Hogers, M. Bleeker, M. Reigans, T. Van-de-Lee, M. Hornes, A. Frijteis, J. Pot, J. Peleman, M. Kuiper, and M. Zabeau. 1995. AFLP: A new technique for DNA fingerprinting. Nucleic Acids Res. 23:4407-4414. doi:10.1093/nar/23.21.4407
- Wei, J., X. Hu, J. Yang, and W. Yang. 2012. Identification of single-copy orthologous genes between *Physalis* and *Solanum lycopersicum* and analysis of genetic diversity in *Physalis* using molecular markers. PLoS ONE. 7(11):e0050164. doi:10.1371/journal.pone.0050164
- Wu, X., G.R. Beecher, S.E. Gebhardt, J.M. Holden, D.B. Haytowitz, and R.L. Prior. 2006. Concentrations of Anthocyanins in Common Foods in the United States and estimation of normal consumption. J. Agric. Food Chem. 54:4069-4075. doi:10.1021/jf0603001
- Zamora-Tavares, P., O. Vargas-Ponce, J. Sánchez-Martínez, and D. Cabrera-Toledo. 2015. Diversity and genetic structure of the husk tomato (*Physalis philadelphica* Lam.) in Western Mexico. Genet. Resour. Crop Evol. 62:141-153. doi:10.1007/s10722-014-0163-9