



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FISIOLOGÍA VEGETAL

RENDIMIENTO Y CALIDAD DE FRUTO EN TOMATES NATIVOS MEXICANOS (*Solanum lycopersicum* L.) Y ANÁLISIS DE EXPRESIÓN GÉNICA EN LA SÍNTESIS DE CAROTENOIDES

MARÍA GUADALUPE SANDOVAL CEBALLOS

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

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS RÉGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe María Guadalupe Sandoval Ceballos, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Víctor A. González Hernández, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Rendimiento y calidad de fruto en tomates nativos mexicanos (Solanum lycopersicum L.) y análisis de expresión génica en la síntesis de carotenoides.

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 10 de noviembre de 2018



Firma del
Alumno (a)



Dr. Víctor A. González Hernández

Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: Rendimiento y calidad de fruto en tomates nativos mexicanos (*Solanum lycopersicum* L.) y análisis de expresión génica en la síntesis de carotenoides realizada por la alumna: **María Guadalupe Sandoval Ceballos** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FISIOLOGÍA VEGETAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. VÍCTOR A. GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

ASESOR



DR. NICACIO CRUZ HUERTA

ASESOR



DR. SALVADOR VALLE GUADARRAMA

Rendimiento y calidad de fruto en tomates nativos mexicanos (*Solanum lycopersicum* L.) y análisis de expresión génica en la síntesis de carotenoides

**María Guadalupe Sandoval Ceballos, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018**

RESUMEN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas de mayor producción y consumo a nivel mundial. Por ser centro de origen, diversidad, y domesticación de esta hortaliza, México cuenta con una amplia colección de variedades nativas que aún se siembran principalmente para autoconsumo y venta en mercados locales. Con el fin de aprovechar esta diversidad es necesario caracterizar estos materiales desde los puntos de vista agronómico, bioquímico y molecular. En este estudio se evaluó el potencial de una muestra de siete variedades nativas contrastantes y de un híbrido experimental entre dos poblaciones nativas, en comparación con dos híbridos comerciales. Estas variedades provienen de cuatro estados del país, Puebla (P-445, P-256 y P-257), Estado México (M-430 y M-12), Campeche (C-256) y Oaxaca (O-427); el híbrido experimental que se evaluó en este trabajo fue desarrollado en el Colegio de Postgraduados. Las evaluaciones se hicieron en términos de rendimiento de fruto, calidad postcosecha, contenido de compuestos funcionales y niveles de expresión génica en la biosíntesis de carotenoides.

La investigación se condujo en tres etapas. En la primera etapa los materiales se caracterizaron en términos de rendimiento por planta y sus componentes, mediante un experimento completamente al azar con 15 repeticiones. En la segunda etapa se evaluó la calidad postcosecha de frutos cosechados en estado rojo maduro, mediante variables como índice de madurez, contenidos de glucosa y fructosa, pH, firmeza, propiedades físicas de la pulpa, y tamaño de frutos. En esta etapa también se midió la tasa de respiración y la pérdida de peso desde el estado verde maduro (madurez fisiológica) hasta el estado de rojo (madurez comercial). En la tercera etapa se evaluó la capacidad antioxidante, el contenido de carotenoides (licopeno y β -caroteno), el contenido de α -tocoferol, y los niveles de expresión génica de los genes *E8* (marcador de estado de madurez), *PDS*, *LYC- ϵ* , *LYC- β 1*, *CYC- β* , involucrados en la biosíntesis de carotenoides.

En rendimiento sobresalió la variedad nativa procedente de Puebla, P-256 porque superó a los híbridos testigos ($P \leq 0.5$), y también las variedades P-445 y P-257 porque igualaron el rendimiento de los testigos. En índice de madurez, las variedades nativas obtuvieron valores mayores a 12.5, valor que superó ampliamente a los de los híbridos comerciales. En contenido de azúcares

sobresalió la variedad tipo “Cherry” M-12 (procedente del Edo. de México) porque registró las concentraciones más altas de glucosa y fructosa, así como de dulzor. En cambio, en firmeza solamente las variedades P-256 y el híbrido experimental O-427×P-445 pudieron igualar a los híbridos comerciales; las demás variedades nativas resultaron inferiores. En la actividad metabólica de los frutos cosechados, las variedades nativas mostraron mayor tasa de respiración que los híbridos comerciales al inicio de la maduración, pero al final de la madurez todas fueron similares a los testigos. En el contenido de licopeno las variedades P-445, M-430, P-257 y O-427×P-445 fueron tan altas como los híbridos comerciales. Pero en contenidos de β -caroteno y α -tocoferol la variedad P-257 fue superior a los testigos. Destaca que todas las variedades nativas superaron a los híbridos comerciales en capacidad antioxidante. En los niveles de expresión génica se encontraron variedades nativas con mayores niveles de expresión que los testigos, como las variedades C-267, M-430 y P-257. Es decir, hay variedades nativas iguales y hasta superiores a los híbridos testigo en características de cantidad y calidad de fruto, excepto en firmeza, por lo que, por sí mismas tales variedades nativas son materiales de interés agronómico e industrial, cuyo valor aún puede ser aumentado mediante mejoramiento genético.

Palabras clave: Tomate nativo, rendimiento, postcosecha, características organolépticas, calidad de fruto, carotenoides.

YIELD AND FRUIT QUALITY IN MEXICAN NATIVE TOMATOES (*Solanum lycopersicum* L.) AND ANALYSIS OF GENE EXPRESSION ON CAROTENOID SYNTHESIS

María Guadalupe Sandoval Ceballos, M.S.

Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is one of the most produced and consumed vegetables worldwide. Mexico, as a center of origin, diversity, and domestication of this vegetable, has a wide variety of native varieties which are still planted mainly for self-consumption or for sale in local markets. To take advantage of this diversity it is necessary to characterize these materials according to agronomic, biochemical, and molecular traits. In this study the potential of seven native varieties and an experimental hybrid formed between two native populations were evaluated in terms of fruit yield, postharvest quality, content of functional compounds and levels of gene expression in carotenoid biosynthesis, compared to one or two commercial tomato hybrids.

This research was conducted across three stages. In the first stage the genetic materials were evaluated for their agronomic behavior under a completely randomized experimental design with 15 repetitions, by measuring fruit yield per plant and the yield components. In the second stage, the same material was studied regarding their postharvest fruit quality in fruits at the ripe red state, with traits such as the maturity index, glucose and fructose concentration, pH, firmness, physical properties of the pulp, and fruit size were measured; the rate of respiration and weight loss were measured from the mature green state (physiological maturity) to the red state (commercial maturity). In the third stage, antioxidant capacity, carotenoid content (lycopene and β -carotene), the α -tocopherol content, and gene expression levels of the *E8*, *PDS*, *LYC- ϵ* , *LYC- β 1*, *CYC- β* genes were evaluated.

Regarding fruit yield, the local variety P-256 produced a higher yield than the commercial hybrids ($P \leq 0.05$), and the native varieties P-445 and P-257 yielded equal as these controls. In the maturity index the native varieties obtained higher values of 12.5, which were higher than the commercial controls. In sugar content, the native variety M12 shows a higher concentration of glucose and

fructose than the other varieties including controls. However, in fruit firmness only the native varieties P-256 and the experimental hybrid O-427×P-445 were equal to the commercial hybrids. Besides, the native varieties showed higher respiration rate than the commercial hybrids at the beginning of the fruit maturation process. In lycopene content the local varieties P-445, M-430 and P-257 and the experimental hybrid O-427×P-445 were equal to commercial hybrids, whereas the native tomato P-257 variety overrated the controls in β -carotene and α -tocopherol. Even more, all native varieties were superior to the commercial hybrids in antioxidant capacity. In the levels of gene expression, native varieties such as C-267, M-430 and P-257 showed higher levels of expression than the checks.

Key words: Yield, postharvest, organoleptic characteristics quality, carotenoids.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Posgraduados-Campus Montecillo por haberme dado la oportunidad de formar parte de su comunidad, por haberme formado profesionalmente y haber contribuido en mi formación personal.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de postgrado.

Al Dr. Víctor A. González Hernández por apoyarme en la dirección de este proyecto, por su tiempo y paciencia. Por compartir su conocimiento y experiencia. Además de su amistad y valiosos consejos para llevar a término este proyecto.

Al Dr. Nicacio Cruz Huerta por la revisión y asesoramiento de este proyecto, por su apoyo y amistad durante mi estancia como estudiante, sus consejos, y paciencia.

Al M. C. Iván Ramírez Ramírez por la adecuada conducción para la realización de este proyecto, y por impulsarme a salir de estancia.

A la Dra. Gabriela Toledo-Ortiz por la revisión y asesoramiento de este proyecto, y por haber compartido su experiencia, conocimientos y la invitación a colaborar en su laboratorio en Reino Unido.

Al Dr. Salvador Valle Guadarrama por la revisión y asesoramiento de este proyecto.

A cada uno de mis profesores por haber compartido sus conocimientos, consejos y experiencias, así como al personal que labora en el Laboratorio de Fisiotecnia Vegetal.

A todos aquellos que hacen posible la libre difusión del conocimiento.

DEDICATORIAS

A Dios como respeto a lo desconocido, a la creación y a lo divino que el arte intenta manifestar.

A mis padres: Ezequiel Sandoval Villa y María Guadalupe Ceballos Sandoval, por ser mi inspiración, por estar en todo momento, por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, por sus consejos y sobre todo por todo su amor y por creer en mí.

A mis tíos Mary y Manuel por todo su apoyo, por ser guía importante en esta etapa de formación profesional y por haberme brindado un hogar a lo largo de estos años.

A mis hermanos Alfredo, Ezequiel y Evelia, gracias por estar conmigo en todo momento, por todo lo que hemos compartido en la vida, y porque a pesar de no estar todo el tiempo junto sabemos podemos contar los unos con los otros.

A mi novio Gustavo por ser una persona muy importante en mi vida, por siempre tener las palabras correctas para animarme, por ser mi cómplice, mi confidente, mi compañero de aventuras.

A Marisol (Kopi), porque a pesar de la distancia y todos los años, siempre has estado presente en todo momento brindándome tu amistad.

A mis amigos de la maestría Vicky, Fabiola, Kike, Adriana, Marlen, Raúl, Yamir, Karla, Deysi, Ramiro, a mis amigos de siempre: Ana, Martha, Adriana, Soria, Oscar, que siempre estuvieron a un lado mío para ayudarme, escucharme, aconsejarme y en muchas ocasiones guiarme.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	vi
AGRADECIMIENTOS	viii
DEDICATORIAS	ix
LISTA DE CUADROS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xv
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
OBJETIVOS	4
HIPÓTESIS.....	5
LITERATURA CITADA	5
Capítulo I. Características fisiológicas y agronómicas de variedades nativas de tomate mexicano	8
1.1 RESUMEN.....	8
1.2 ABSTRACT.....	8
1.3 INTRODUCCIÓN	9
1.4 HIPÓTESIS.....	10
1.5 MATERIALES Y MÉTODOS	11
Material experimental	11
Localización del experimento	11
Diseño experimental.....	11
Manejo agronómico	11
Variables medidas	14
1.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16

Variables fisiológicas	16
Rendimiento de fruto y sus componentes	19
1.7 CONCLUSIONES	24
1.8 LITERATURA CITADA	25
Capítulo II. Calidad postcosecha de frutos de tomate nativo mexicano	27
2.1 RESUMEN.....	27
2.2 ABSTRACT.....	28
2.3 INTRODUCCIÓN	28
2.4 HIPÓTESIS.....	30
2.5 MATERIALES Y MÉTODOS	30
Material vegetal.....	30
Diseño experimental	31
Variables	31
2.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
Calidad postcosecha del fruto	36
Características físicas de la calidad del fruto	42
Cambios durante la maduración postcosecha del fruto.....	45
2.7 CONCLUSIONES	51
2.8 LITERATURA CITADA	52
Capítulo III. Determinación de contenidos de licopeno, β-caroteno y α-tocoferol, de la capacidad antioxidante en frutos de variedades nativas de tomate mexicano y expresión génica en la ruta biosintética de carotenoides	57

3.1 RESUMEN.....	57
3.2 ABSTRACT.....	57
3.3 INTRODUCCIÓN	58
3.4 HIPÓTESIS.....	59
3.5 MATERIALES Y MÉTODOS	60
Diseño experimental	60
Variables medidas	60
Cuantificación de licopeno, β -caroteno y α -tocoferol.....	61
Análisis de expresión génica.....	62
Análisis de expresión génica por qPCR.....	65
3.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66
Calidad nutracéutica.....	66
Concentración de licopeno, β -caroteno y α -tocoferol.....	66
Expresión de genes involucrados en la biosíntesis de carotenoides	68
3.7 CONCLUSIONES	74
3.8 LITERATURA CITADA	76
CONCLUSIONES GENERALES	79

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1. Descripción de las variedades de tomates mexicanos nativos estudiadas y de los tomates híbridos comerciales utilizados como testigos.	13
Cuadro 1.2. Descriptores estadísticos para las variables evaluadas en planta y fruto en promedio de siete variedades de tomates nativos, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales.	17
Cuadro 1.3. Comparación de medias por variedad para las variables de tasa de fotosíntesis neta, unidades de Spad y altura de planta de siete variedades de tomates nativos, un híbrido experimental y un híbrido comercial.	18
Cuadro 1.4. Comparación de medias para las variables de número de flores y frutos, peso de fruto y racimos en plantas de siete variedades de tomates nativos, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales.	22
Cuadro 2.1. Descriptores estadísticos para las variables de calidad organoléptica evaluadas en frutos de siete variedades de tomates nativos, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales	37
Cuadro 2.2. Comparación de medias para las variables organolépticas en siete variedades de tomates nativos un híbrido experimental y dos híbridos comerciales.	38
Cuadro 2.3. Comparación de medias para las variables índice de redondez, diámetro polar y ecuatorial en frutos de tomate siete variedades de tomates nativos, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales.	42
Cuadro 2.4. Valores promedios para la fuerza máxima y cohesividad de la pulpa de tomate en siete variedades de tomates nativos, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales.	44
Cuadro 3.1. Ecuaciones para determinar la concentración de licopeno, betacaroteno y α -tocoferol en muestras de tomate liofilizado.	62
Cuadro 3.2. Secuencias de los iniciadores (“primers”) utilizados para el análisis de expresión génica mediante qPCR.	63
Cuadro 3.3. Formulación de la mezcla maestra para síntesis de cDNA.	65

Cuadro 3.4. Componentes para la mezcla de la reacción de qPCR.	65
Cuadro 3.5. Comparación de medias para la concentración de licopeno, β -caroteno y α - tocoferol y capacidad antioxidante, en siete variedades de tomate nativo mexicano, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales.	66

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1. Porcentaje de pérdida de peso en frutos de tomates nativos y de dos híbridos comerciales (DRD-8551 y El Cid). Comparación de medias para los días después de cosecha 0 y 12. Letras iguales no tienen diferencias significativas entre genotipos (Tukey, 0.05). DSH para el día 12 = 3.77 46
- Figura 2.2. Cambios en la tasa de respiración durante la maduración de frutos de tomates nativos mexicanos, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales (DRD-8551 y El Cid). Letras iguales indican medias sin diferencias significativas entre variedades (Tukey, 0.05). DSH para el día 0 = a 1.5. DSH para el día 12 = 0.72. 48
- Figura 2.3. Medias de luminosidad, croma y hue de seis variedades de tomate nativo, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales. 50
- Figura 3.1. Ruta de biosíntesis de carotenoides, G3P: gliceraldehído 3-fostato, DXP: desoxixilulosa 5-fosfato, MEP: Metileritritol 4 – fosfato, IPP: isopentenil difosfato, DMAPP: dimetilalil difosfato. (D’Andrea *et al.*, 2018; Rosati *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2015). 69
- Figura 3.2. Niveles de transcripción para el gen *E8* en frutos de siete variedades nativas de tomate mexicano, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales. Letras iguales no tienen diferencias significativas entre variedades (Tukey, 0.05). 70
- Figura 3.3. Niveles de transcripción para el gen *PDS* en frutos de siete variedades nativas de tomate mexicano, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales. Letras iguales no tienen diferencias significativas entre variedades (Tukey, 0.05). 71
- Figura 3.4. Niveles de transcripción para el gen ϵ -*LYC* en frutos siete variedades nativas de tomate mexicano, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales. G1: grupo 1 de 0.08 a 0.1. G2: grupo 2 de 0.04 a 0.05 G3: grupo 3 de 0.002 a 0.025. (LDS-Fisher, 0.05). 72
- Figura 3.5. Niveles de transcripción para el gen β -ciclase de licopeno específica para el cloroplasto (β -*LCY*) en frutos de siete variedades nativas de tomate mexicano, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales. Letras iguales no tienen diferencias significativas entre variedades (Tukey, 0.05). 73

Figura 3.6. Niveles de transcripción para el gen β -ciclase de licopeno específica para el cromoplasto (β -CYC) en frutos de siete variedades nativas de tomate mexicano, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales. Letras iguales no tienen diferencias significativas entre variedades (Tukey, 0.05)..... 73

INTRODUCCIÓN GENERAL

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza de mayor importancia económica y con mayor producción a nivel mundial, con una producción anual de alrededor de 177.04 millones de toneladas en 2016 (FAOSTAT, 2018). En México es uno de los principales cultivos de exportación. El tomate se originó en la región andina que ahora abarca parte de Chile, Bolivia, Ecuador, Colombia y Perú. El momento y lugar de la domesticación del tomate no se conocen con certeza (Bai y Lindhout, 2007). En la actualidad se reconoce a México y Perú como los dos centros independientes de domesticación del tomate (Rick y Holle, 1990; Peralta y Spooner, 2007).

El tomate domesticado fue llevado a Europa en el siglo XVI y luego se dispersó a muchas áreas del mundo, donde la selección de la fruta y su tamaño desempeñó un papel clave en la diversificación morfológica de esta especie. Durante su evolución y domesticación, *S. lycopersicum* ha sufrido varios "cuellos de botella" genéticos impuestos por la autopolinización, los efectos fundadores, la selección artificial y natural, además de la endogamia extrema de genotipos limitados, particularmente en Europa y América del Norte, como resultado de la industrialización de la agricultura y el avance de los programas de fitomejoramiento durante el siglo XX (Bauchet y Causse, 2012; Cortés-Olmos *et al.*, 2015; Sacco *et al.*, 2015).

A través de la domesticación, la investigación y las actividades de reproducción implementadas por científicos y agricultores de todo el mundo, se han desarrollado variedades modernas de tomate (en su mayoría híbridos) con todas las formas, colores y tamaños de fruto (Bai y Lindhout, 2007). En México las variedades nativas y silvestres de tomate se distribuyen desde Sinaloa hasta Chiapas, incluyendo la Península de Yucatán y se les conoce con diversos nombres como cuatomate, tomatillo, tinguaraque, chusma, ojo de venado, bule, calabacito, guajito, etc. (Gaspar-Peralta *et al.*, 2012).

La variabilidad inter- e intra-poblacional de las variedades nativas de tomate ha sido objeto de estudios en regiones donde todavía se cultivan tales variedades locales, en los que se ha demostrado claramente la diversidad en caracteres morfológicos y agronómicos, calidad de la fruta, sólidos solubles, contenido de micronutrientes y compuestos aromáticos volátiles (Passam *et al.*, 2007). Si bien las variedades locales de tomate aún se cultivan para uso y consumo local en muchas regiones del mundo, su distribución comercial es muy restringida. Entre la riqueza genética de esta especie se han identificado variedades nativas de tomate mexicanos que poseen características sensoriales superiores a las variedades comerciales que se encuentran en los mercados citadinos (Méndez *et al.*, 2011; Juárez-López *et al.*, 2009; Vela-Hinojosa *et al.*, 2018; Urrieta-Velázquez *et al.*, 2012; Maldonado-Peralta *et al.*, 2016).

Actualmente los mercados tienden hacia el consumo de alimentos funcionales que aporten beneficios a la salud, debido a que los frutos contienen carotenoides como licopeno, β -caroteno y luteína, así como otros compuestos como tocoferoles, flavonoides, vitamina C, etc. El consumo del tomate se ha relacionado con la reducción del riesgo del desarrollo de algunos tipos de cáncer, con la prevención del desarrollo de enfermedades cardiovasculares por sus efectos antioxidantes, además de prevenir condiciones como la degeneración macular relacionada con la edad (Flores *et al.*, 2017; Enfissi *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2015). Es por estas razones que el conocimiento de los mecanismos de acumulación de compuestos nutraceuticos es de interés desde el punto de vista agronómico, de ingeniería molecular y bioquímico (Liu *et al.*, 2015).

Además, los parientes silvestres del tomate se han utilizado como fuentes de genes para el mejoramiento de los cultivos, por lo que también son recursos interesantes de variación genética para la reproducción por introgresión, y comprenden fuentes exclusivas de muchos genes de resistencia a enfermedades o factores ambientales para las variedades de tomates cultivados

(Passam *et al.*, 2007). Sin embargo, aún existe escasa información acerca de los parámetros de calidad postcosecha, del potencial de rendimiento, nutricional y de la variación genética de las variedades nativas mexicanas.

Dado que el Colegio de Postgraduados posee una colección de 600 variedades de tomates nativos, las cuales se obtuvieron mediante el proyecto “Valoración Integral de la Diversidad de Poblaciones Nativas de Jitomate Mexicano (*Lycopersicon esculentum* M.)” realizado por el Dr. Porfirio Ramírez Vallejo (QEPD) en el periodo del 2009 al 2013, es necesario caracterizar estos materiales genéticos con el fin de identificar las variedades con características sobresalientes a ser incorporadas en nuevas variedades comerciales mediante programas formales de mejoramiento genético.

En este contexto, esta investigación tuvo por objetivo generar información de las características de rendimiento, calidad organoléptica y nutracéutica de una muestra representativa de las variedades nativas de tomate mexicano. Dicha información servirá para fomentar la conservación de los materiales nativos, así como su inclusión en programas de mejoramiento para la generación de nuevas variedades con mejores características de calidad organoléptica y nutracéutica.

Dada la amplia cobertura de esta investigación, para su operación se dividió en tres etapas, mismas que corresponden a los tres capítulos de la presente tesis.

En el Capítulo I se describen las características de rendimiento y sus componentes (como número de flores y frutos, peso de racimos, etc.), así como variables relacionadas con la fisiología de las plantas.

En el Capítulo II se describen las características de calidad organoléptica que se han relacionado más con el sabor y la aceptación de los consumidores del producto en fresco, como el índice de madurez y contenido de glucosa y fructosa. También se hicieron evaluaciones para describir

aspectos del proceso de maduración de los frutos como tasa de respiración, pérdida de peso y cambios en la coloración de los frutos; cabe mencionar que aquí se describe una variante metodológica para medir la tasa de respiración en frutos. Además, se evaluaron características relacionadas con la reología de la pulpa de tomate, que son de relevancia industrial.

La tercera y última etapa experimental que compone al Capítulo III se llevó a cabo en las Universidades de Lancaster y de Leeds en el Reino Unido, y consistió en la medición de concentraciones de compuestos de importancia nutracéutica en el fruto, como licopeno, β -caroteno y α -tocoferol, así como de los niveles de expresión de genes involucrados en biosíntesis de carotenoides (*PDS*; ϵ -*LYC*, β -*LYC* y β -*CYC*).

OBJETIVOS

- Comparar siete tomates nativos y un híbrido experimental (formado a partir de variedades nativas) en contraste con dos híbridos comerciales, en cuanto a su desempeño en variables agronómicas como el rendimiento de fruto y sus componentes, así como en características fisiológicas de planta que podrían explicar diferencias en crecimiento y rendimiento.
- Cuantificar las diferencias entre variedades nativas de tomate mexicano vs. híbridos comerciales, en cuanto a compuestos implicados en la palatabilidad de los frutos.
- Cuantificar los contenidos de licopeno, β -caroteno y α -tocoferol, y la actividad antioxidante, como características que permiten determinar el potencial nutracéutico de las variedades nativas y comerciales.
- Medir los niveles de expresión de genes involucrados en la biosíntesis de carotenoides, en variedades nativas de tomate mexicano en contraste con dos híbridos comerciales.

HIPÓTESIS

- Hay variedades nativas de tomate mexicano que, al ser crecidas bajo un sistema hidropónico de producción tecnificada, pueden tener rendimientos de frutos similares a las variedades comerciales.
- Los frutos de algunos tomates nativos mexicanos presentan mejores características sensoriales y nutraceuticas, en comparación de los híbridos comerciales.
- Algunas variedades nativas presentan mayores niveles de expresión de genes involucrados en la ruta de biosíntesis de carotenoides.

LITERATURA CITADA

- Bai, Y., and P. Lindhout. 2007. Domestication and breeding of tomatoes: What have we gained and what can we gain in the future? *Annals of Botany* 100: 1085–1094. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm150>.
- Bauchet, G., and M. Causse. 2012. Genetic diversity in tomato (*Solanum lycopersicum*) and its wild relatives. *Genetic Diversity in Plants* 8:133-161. <https://doi.org/10.5772/33073>.
- Cortés-Olmos, C., J. V. Valcárcel, J. Roselló, M. J. Díez, and J. Cebolla-Cornejo. 2015. Traditional eastern spanish varieties of tomato. *Scientia Agricola* 5: 420–431.
- Enfissi, E. M.A., M. Nogueira, P. M. Bramley, and P. D. Fraser. 2017. The regulation of carotenoid formation in tomato fruit. *Plant Journal* 89: 774–788. <https://doi.org/10.1111/tpj.13428>.
- FAOSTAT. 2018. Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division website: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/>. (Consultado el 10 de agosto del 2018).

- Flores, P., E. Sánchez, J. Fenoll, and P. Hellín. 2017. Genotypic variability of carotenoids in traditional tomato cultivars. *Food Research International* 100: 510–516. doi.org/10.1016/j.foodres.2016.07.014.
- Gaspar-Peralta, P., J. C. Carrillo-Rodríguez, J. L. Chávez-Servia, A. M. Vera-Guzmán, and I. Pérez-León. 2012. Variación de caracteres agronómicos y licopeno en líneas avanzadas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Phyton* 81: 15–22.
- Juárez-López, P., R. Castro-Brindis, T. Colinas-León, P. Ramírez-Vallejo, M. Sandoval-Villa, D.W. Reed, L. Cisneros-Zevallos, and S. King. 2009. Evaluation of quality in fruits of seven native tomato (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*) genotypes. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 15: 5–9.
- Liu, L. H., Z. Shao, M. Zhang, and Q. Wang. 2015. Regulation of carotenoid metabolism in tomato. *Molecular Plant* 8: 28–39. doi:/10.1016/j.molp.2014.11.006.
- Maldonado-Peralta, R., P. Ramírez-Vallejo, V.A. González-Hernández, F. Castillo-González, M. Sandoval-Villa, M. Livera-Muñoz, and N. Cruz-Huerta. 2016. Riqueza agronómica en colectas mexicanas de tomates (*Solanum lycopersicum* L.) nativos. *Agroproductividad* 9: 68–75.
- Méndez, I., A. M. Vera, J.L. Chávez, and J. C. Carrillo-Rodríguez. 2011. Quality of fruits in mexican tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) landraces. *Vitae, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica* 18: 26–32.
- Passam, H. C, I. C Karapanos, P. J Bebeli, and D. Savvas. 2007. A review of recent research on tomato nutrition, breeding and post-harvest technology with reference to fruit quality. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology* 1: 1–21.

- Peralta, I. E., and D. M. Spooner. 2007. History, origin and early cultivation of tomato (Solanaceae). In M. K. Razdan & A. K. Mattoo (Eds.), Genetic Improvement of Solanaceous Crops Volume 2: Tomato (Vol. 2): Science Publisher.
- Rick, C. M., and M. Holle. 1990. Andean *Lycopersicon esculentum* var. cerasiforme: genetic variation and its evolutionary significance. *Economic Botany* 44: 69–78. <https://doi.org/10.1007/BF02860476>.
- Sacco, A., V. Ruggieri, M. Parisi, G. Festa, M. Rigano, M. E. Picarella, A. Mazzucato, and A. Barone. 2015. Exploring a tomato landraces collection for fruit-related traits by the aid of a high-throughput genomic platform. *PLoS ONE* 10(9): e0137139. doi: 10.1371/journal.pone.0137139
- Urrieta-Velázquez, J. A., M. N. Rodríguez-Mendoza, P. Ramírez-Vallejo, G. A. Baca-Castillo, L. M. Ruiz-Posada, and J. A. Cueto-Wong. 2012. Variables de producción y calidad de tres selecciones de jitomate de costilla (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 3: 371–81. doi: /10.5154/r.rchsh.2010.05.016.
- Vela-Hinojosa, C., H. B. Escalona-Buendía, J. A. Mendoza-Espinoza, F. Díaz de León-Sánchez, R. Lobato-Ortiz, J. E. Rodríguez-Pérez, M. Ramírez-Aguilar, F. Pérez-Díaz, and Villa-Hernández J. M. 2018. Chemical and sensory analysis of native genotypes and experimental lines of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Fruits* 73: 60–71. doi:10.17660/th2018/73.1.7.

Capítulo I. Características fisiológicas y agronómicas de variedades nativas de tomate mexicano

1.1 RESUMEN

En México, el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas de mayor producción y exportación, de la que se siembran 51,861 ha con semillas híbridas. Los altos rendimientos de las variedades híbridas han relegado el uso de las variedades nativas de tomate mexicano, aunque éstas tienen potencial para ser utilizadas exitosamente en sistemas intensivos de producción. El objetivo de este trabajo fue comparar siete variedades nativas y un híbrido experimental entre dos poblaciones nativas, en contraste con dos híbridos comerciales, en cuanto al rendimiento de frutos y sus componentes, así como en los procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento y producción de la planta, tales como la tasa de fotosíntesis neta y el contenido de clorofila. Las plantas fueron crecidas durante el ciclo otoño-invierno del 2017 en condiciones de invernadero e hidroponía con solución nutritiva Steiner, y trasplantadas en bolsas de 10 L rellenas con tezontle de grano fino como sustrato. En tasa de fotosíntesis neta no se detectaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre las variedades estudiadas. En cambio, en el contenido de clorofila medido en unidades Spad sí las hubo, ya que el híbrido experimental O-424xP-445 igualó al híbrido El Cid, y ambos superaron a las demás variedades evaluadas. En rendimiento destacó la variedad nativa P-256 porque superó a los híbridos comerciales con un promedio de 4.59 kg/planta, y también sobresalieron las variedades P-445 y P-257 porque igualaron a los híbridos con rendimientos de 3.93 y 3.95 kg/planta, respectivamente. En este estudio las variedades de mayor rendimiento de fruto lo debieron a que combinaron un alto peso de racimo (PR) con altos valores de peso individual del fruto (PIF).

Palabras clave: Rendimiento, componentes del rendimiento, tomate nativo, fotosíntesis, clorofila.

1.2 ABSTRACT

In Mexico, tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is one of the most produced and exported vegetables where around 51,861.1 ha of hybrid tomatoes are planted. The high yielding hybrids

have relegated the use of native Mexican tomato varieties, but these native varieties have the potential to be used in intensive production systems. The objective of this work was to compare seven native varieties and one experimental hybrid in contrast to two commercial hybrids, in terms of fruit yield and their components, and in traits involved in physiological processes such as the net photosynthesis rate and the content of chlorophyll in Spad units. Plants were grown during the Autumn - Winter season in a plastic greenhouse and watered and fed by means of a hydroponic irrigation system that provided the Steiner nutrient solution. Each plant was transplanted in 10 L bags filled with red porous volcano gravel as substrate. Regarding the rate of net photosynthesis, no differences were found among the varieties studied, whereas in the content of chlorophyll the experimental hybrid O-424xP-445 equaled the El Cid hybrid. In fruit yield, the P-256 native variety produced 4.59 kg/plant which was higher than yields of the commercial hybrids, and the native varieties P-445 and P-257 were equal to the hybrids with yields of 3.93 and 3.95 kg/plant, respectively. In this study the higher yielding varieties could be explained by a high raceme weight (RW) combined with a high individual fruit weight (IFW).

Key words: Yield, yield components, native tomato, photosynthesis, chlorophyll.

1.3 INTRODUCCIÓN

En México, el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas de mayor producción y exportación, se siembran 93, 376 ha de tomates híbridos, con rendimiento promedio de 43.3 t ha⁻¹ y una producción anual de 4'047,171 t que, se concentran principalmente en los estados el noroeste del país, sobre todo en Sinaloa con una superficie sembrada de 14,220 ha (FAOSTAT, 2018).

México es uno de los centros de origen y diversidad de esta especie vegetal, cuya mayor diversidad se encuentra principalmente en las zonas del centro y sureste del país, donde se ha mantenido gracias a que los productores regionales los siembran en pequeñas extensiones de tierras

(parcelas de 1,000 m²) o en sistemas tradicionales de traspatio, generalmente para autoconsumo o venta en mercados locales (Maldonado *et al.*, 2016).

En comparación con el rico reservorio genético que existe en las especies silvestres de tomate, el cultivado es genéticamente pobre. Se estima que los genomas de los cultivares comerciales de tomate contienen menos de 5 % de la variación genética de sus parientes silvestres (Bai y Lindhout, 2007).

Debido a la importancia de caracterizar los genotipos nativos de tomate, el propósito de este trabajo de investigación fue comparar siete tomates nativos, un híbrido experimental entre variedades nativas y dos híbridos comerciales, en cuanto a su desempeño en variables agronómicas como el rendimiento de fruto y sus componentes, así como en características fisiológicas que puedan explicar diferencias en crecimiento y rendimiento, tales como la tasa de fotosíntesis neta y el contenido estimado de clorofila.

1.4 HIPÓTESIS

- Hay variedades nativas de tomate que poseen características agronómicas y fisiológicas iguales o superiores a las de variedades híbridas de tomate comercial.
- Se pueden encontrar variedades nativas de tomate que superen o al menos igualen a los híbridos comerciales, en cuanto al rendimiento de fruto y sus componentes, así como en eficiencia fisiológica medida como tasa instantánea de fotosíntesis y contenido de clorofila en hojas.
- Las variedades nativas de tomate mexicano son capaces de obtener rendimientos de frutos similares al de las variedades híbridas comerciales cuando son crecidas bajo un sistema hidropónico de producción intensiva de invernadero con fertirrigación.

1.5 MATERIALES Y MÉTODOS

Material experimental

Se compararon siete variedades de tomates nativos mexicanos, un híbrido experimental formado con la cruce entre dos variedades nativas, y dos híbridos comerciales usados como testigos. Las características y detalles del origen de las variedades mexicanas nativas evaluadas en el presente trabajo, y de las variedades comerciales que sirvieron como testigos se detallan en el Cuadro 1.1.

Localización del experimento

El experimento se llevó a cabo en un invernadero de plástico del área de Fisiología Vegetal del Colegio de Postgraduados, ubicado en el km 36.5 de la carretera México- Texcoco, Montecillo, Texcoco, Edo. de México. Las coordenadas del lugar son 19°28'05" LN y 98°54'09" LW, a una altitud de 2,243 m. El estudio consistió en la comparación agronómica y fisiológica de siete variedades de tomates nativos mexicanos, un híbrido experimental proveniente de dos variedades nativas, y dos híbridos comerciales como testigos (Cuadro 1.1).

Diseño experimental

Para la evaluación de las variedades de tomate aquí estudiadas se empleó un diseño experimental completamente al azar con diez tratamientos. La unidad experimental consistió de una planta individual colocada en una maceta. Se establecieron 15 plantas de cada variedad, aunque el número de plantas empleado para las mediciones fue diferente entre las variables medidas, como se indica en cada sección correspondiente.

Manejo agronómico

Preparación de sustrato y contenedores. Las plantas se crecieron en contenedores rellenos con tezontle (roca volcánica) de grano fino. Los contenedores fueron bolsas de polietileno negro

de 30 x 40 cm las cuales se llenaron hasta su máxima capacidad, y una vez llenadas se desinfectó el sustrato mediante la aplicación de un riego pesado con una solución de agua con sales cuaternarias de amonio y dos enjuagues con agua. Posteriormente, las bolsas se colocaron alineadas en hileras a una distancia de 20 cm entre bolsas a lo largo de la hilera, y 50 cm entre hileras.

Cuadro 1.1. Descripción de las variedades de tomates mexicanos nativos estudiadas y de los tomates híbridos comerciales utilizados como testigos.

Variedad	Origen	Estados de procedencia	Forma	Aspecto del fruto
DRD 8551-Seminis	Híbrido comercial	----	Bola	
El Cid- Harris Moran	Híbrido comercial	----	Saladette	
C-267	Campeche	Campeche	Bola plana	
O-427	Santa Cruz Xitla	Oaxaca	Arriñonado	
P-445	Altepeji Ajalpan	Puebla	Pimiento	
M-430	San Martín Malinalco	Edo. México	Pera	
M-12	Montecillos	Edo. México	Cherry	
P-256	Altepeji Ajalpan	Puebla	Bola	
P-257	Altepeji Ajalpan	Puebla	Acostillado	
O-427×P-445	Híbrido experimental entre tomates nativos	---	Pimiento	

Fertirriego. Para simultáneamente regar y fertilizar las plantas se utilizó la solución nutritiva de Steiner (1984) que se aplicó mediante riego por goteo a partir del trasplante. Se aplicaron nueve riegos al día a intervalos de una hora, a una dosis inicial de 0.250 L por planta hasta que éstas alcanzaron 30 cm; luego la dosis se incrementó hasta 1.2 L por planta. El pH de la solución se mantuvo en el rango de 5.5-6.0.

Producción de plántula. Las plántulas se produjeron en almácigo con charolas de poliestireno de 200 cavidades previamente llenadas con turba y humedecida con agua. Se sembró una semilla por cavidad. En esta etapa el riego se hizo con agua simple, y a partir de los 15 d después de la emergencia y hasta el momento del trasplante las plántulas se regaron con solución nutritiva Steiner diluida a 25 %.

Trasplante. El trasplante se hizo a los 40 d después de la siembra, en bolsas llenas de tezontle donde se colocó una plántula por contenedor.

Tutorado. Por ser de hábito indeterminado, las plantas requirieron de un soporte mecánico (tutor), el cual se colocó cuando la planta alcanzó aproximadamente los 30 cm de altura, para lo cual se utilizó rafia tratada contra la radiación ultravioleta.

Polinización. Se hizo polinización manual durante toda la etapa de floración.

Poda. Periódicamente, a las plantas de tomate se les eliminaron las yemas axilares con la finalidad de conducir las con un solo tallo principal para producción de los racimos de flores y frutos, y así direccionar los fotoasimilados producidos por las hojas hacia dichos racimos.

Variables medidas

Altura de planta (cm). La altura de planta se midió en cuatro plantas por variedad, desde la base del tallo hasta la hoja del séptimo racimo. Para estas mediciones sólo se utilizó como testigo al híbrido comercial El Cid.

Tasa instantánea de fotosíntesis neta ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). En todas las plantas medidas esta tasa se registró en el foliolo apical de la hoja madura del cuarto racimo floral formado (a los 103 d después del trasplante, aprox.), en tres plantas por variedad, mediante un analizador portátil de asimilación de CO_2 provisto con sensor de gases al infrarrojo (LI-6400, LI-COR, USA). La toma de datos se hizo a partir de las 12 pm del día hasta las 2 pm, cuando la tasa de fotosíntesis alcanza

los máximos valores del día, a temperatura promedio de 31 °C. Para esta variable sólo se utilizó como testigo al híbrido comercial El Cid.

Contenido de clorofila (Unidades Spad). El contenido de clorofila se midió en la misma hoja madura en la que se determinó fotosíntesis, en seis plantas por variedad, con un aparato portátil Minolta SPAD® 502 (Soil Plant Analysis Development, Japan). En cada hoja medida se tomaron mediciones en cinco partes, a los 103 d después del trasplante. Para estas mediciones se utilizó como testigo solamente al híbrido comercial El Cid.

Número de flores y frutos. El número de flores y frutos formados por racimo se registró en cuatro plantas por variedad hasta el séptimo racimo. El número de frutos por racimo fue registrado después del cuajado de fruto y posteriormente se hizo aclareo de frutos, dejando 6 o 7 frutos por racimo, con el fin de obtener frutos de mayor tamaño.

Peso de fruto individual (g). Se pesaron cuatro frutos en estado rojo maduro por racimo, hasta el cuarto racimo, en cuatro plantas por variedad. Para esta medición se utilizó una balanza digital (Noval, TH-I-EK, China).

Peso de racimos (g). Se registró el peso de cuatro racimos de frutos maduros en cuatro plantas por cada variedad; estas mediciones se hicieron periódicamente hasta el cuarto racimo con una balanza digital (Noval, TH-I-EK, China).

Rendimiento. El rendimiento de fruto por planta (RP), se calculó mediante la suma del peso de los primeros cuatro racimos de frutos en la etapa de madurez de consumo (Ecuación 1.1; no se midió hasta el séptimo racimo como se había planificado, debido a que ocurrió una helada que detuvo el desarrollo).

$$RP = \sum_{i=0}^4 \text{Peso de racimo} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

1.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Entre las 10 variedades aquí estudiadas se detectaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para todas las variables medidas (Cuadro 1.2), lo que demostró que existe una alta variabilidad de características y la correspondiente diversidad genética entre dichas variedades. Un aspecto relevante es que se identificaron variedades nativas de tomate que crecidas en condiciones de invernadero y ferti-irrigadas, presentaron un comportamiento agronómico similar al de las variedades mejoradas. También se observó que, en los componentes del rendimiento como número de flores y frutos, peso individual de frutos, etc., algunas variedades nativas obtuvieron promedios iguales e incluso mayores que los híbridos comerciales.

Variables fisiológicas

Contenido de clorofila (CC). En contenido de clorofila se encontró que el híbrido experimental (O-427×P-445) igualó al híbrido comercial El Cid (66.1 y 60.2 unidades Spad, respectivamente) (Cuadro 1.3) y ambos híbridos superaron al resto de las variedades evaluadas. Además, todas las variedades nativas también fueron estadísticamente iguales al híbrido El Cid, con excepción de las variedades C-267, M-12 y P-256. El rango de CC para las variedades nativas fue de 42.4 a 66.1 unidades.

Cuadro 1.2. Descriptores estadísticos para las variables evaluadas en planta y fruto en promedio de siete variedades de tomates nativos, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales.

Variable	Media general	DE	GL	n	R²	Valor-p	Mín	Máx
Contenido de clorofila (unidades Spad)	55.7	7.61	8	54	0.85	<0.0001	38.8	69
Tasa de fotosíntesis neta ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	16.3	1.94	8	27	0.59	0.018	12.8	19.9
Altura de planta al séptimo racimo (cm)	201.1	14.4	8	36	0.83	<0.0001	178	234
Número de flores por planta al séptimo racimo	97.4	38.8	9	40	0.98	<0.0001	45	169
Número de frutos por planta al séptimo racimo	75.3	26.1	9	40	0.98	<0.0001	31	131
Peso individual de fruto (g)	124.9	55.9	9	160	0.93	<0.0001	27	290
Peso de frutos por racimo (g)	837.8	267.3	9	160	0.91	<0.0001	269	1310
Rendimiento por planta (kg) al cuarto racimo	3.3	1.04	9	40	0.99	<0.0001	1.16	4.7

DE: desviación estándar. GL: grados de libertad del modelo. n: número de observaciones. R²: coeficiente de determinación. Mín: valor mínimo. Máx: valor máximo. Para las variables de contenido de clorofila, tasa de fotosíntesis neta y altura de planta, sólo se utilizó como testigo la variedad El Cid. (Tukey, 0.05).

Cuadro 1.3. Comparación de medias por variedad para las variables de tasa de fotosíntesis neta, unidades de Spad y altura de planta de siete variedades de tomates nativos, un híbrido experimental y un híbrido comercial.

Variedad	CC (Unidades Spad)	TFN ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Altura de planta (cm)
El Cid	60.22 ab \pm 1.5	15.38 ab \pm 0.19	229.50 a \pm 3.87
C-267	42.43 d \pm 3.4	14.20 b \pm 0.80	191.50 cd \pm 12.66
O-427	58.70 bc \pm 2.0	15.34 ab \pm 0.52	194.75 bcd \pm 5.19
P-445	57.87 bc \pm 3.8	18.15 ab \pm 1.24	198.25 bc \pm 5.74
M-430	58.73 bc \pm 4.9	17.39 ab \pm 1.58	179.75 d \pm 2.06
M-12	53.30 c \pm 4.9	16.10 ab \pm 2.22	209.75 b \pm 7.08
P-256	46.37 d \pm 1.8	14.98 ab \pm 2.01	197.75 bc \pm 8.18
P-257	59.28 bc \pm 1.6	17.26 ab \pm 2.34	206.00 bc \pm 5.77
O-427×P-445	66.10 a \pm 2.5	18.73 a \pm 0.82	203.00 bc \pm 4.24
DSH (0.05)	6.08	4.27	16.22

El Cid: híbrido comercial usado como testigo. TFN: tasa instantánea de fotosíntesis neta. CC: contenido de clorofila en unidades Spad. DSH: diferencia significativa honesta. Medias con la misma letra no tienen diferencias significativas entre variedades (Tukey, 0.05). Mediciones tomadas cuando la planta tenía el cuarto racimo floral formado.

Los valores aquí encontrados en clorofila coinciden en gran medida con las reportadas por Rezende-Fontes y De Araujo (2006), quienes reportaron un rango de 50.7 a 57.8 unidades Spad en el híbrido Carmen a los 98 d después del trasplante. En cinco variedades híbridas de tomate (Max, Trust, Match, Caruso y Jumbo), Sandoval-Villa *et al.* (2002) reportaron lecturas Spad de 46 a 57, y detectaron que la principal fuente de variación fue la variedad, lo que coincide con el presente estudio, posiblemente porque todas las variedades fueron crecidas en las mismas condiciones de invernadero con fertirriego. En los resultados aquí obtenidos se puede destacar que el CC del híbrido experimental O-427×P-445 fue más alto que en las variedades híbridas evaluadas en los reportes mencionados y que la mayoría de las variedades nativas se encuentran dentro de los rangos reportados en tales estudios.

Tasa instantánea de fotosíntesis neta. Para los valores de tasa neta de fotosíntesis, la única diferencia estadística que se presentó fue entre el híbrido experimental O-427×P-445 y la variedad

nativa C-267, que obtuvieron el valor más alto y el más bajo en CC. En las demás variedades, incluyendo los híbridos comerciales, no se detectaron diferencias estadísticamente significativas (Cuadro 1.3).

Según Song *et al.* (2016), además del contenido de clorofila, en el proceso de fotosíntesis influyen otros factores como condiciones de luz, regulación de estomas, estado de salud de las plantas, etc. Por su parte, Torres *et al.* (2005) afirmaron que la velocidad de la fotosíntesis, un proceso metabólico fundamental en las plantas, está directamente relacionada con la abundancia de clorofila en las hojas, porque este pigmento es esencial en la absorción de la energía radiante y su conversión a energía química para impulsar las reacciones bioquímicas de fijación del carbono; por tanto, el verdor de la hoja puede estar estrechamente relacionado con el rendimiento fotosintético.

Altura de planta. En esta medida del tamaño de planta, el testigo híbrido El Cid alcanzó una altura promedio de 229 cm, con lo que superó ($P \leq 0.05$) a todas las variedades nativas. En las variedades nativas la altura de planta fluctuó entre 179.7 y 209.7 cm (Cuadro 1.3).

Rendimiento de fruto y sus componentes

Para poder analizar el rendimiento de una planta es necesario el estudio de los componentes del rendimiento, dentro de los cuales se encuentran, número de flores y número de frutos por planta, peso individual de frutos, etc., porque permiten explicar las diferencias en el rendimiento de fruto por planta.

Número de flores. Las variedades nativas producen una gran cantidad de flores debido a que sus inflorescencias son del tipo racimo, estructura reproductiva de crecimiento indeterminado (Urrieta-Velázquez *et al.*, 2012). Vásquez-Ortiz *et al.* (2010) ya han reconocido el potencial

productivo de las variedades nativas de tomate, pues consideran que, las formas silvestres forman un mayor número de flores y poseen un alto porcentaje de cuajado de fruto.

En general, las variedades comerciales desarrollan de siete a nueve flores por racimo, característica que es estable en estas poblaciones. En las variedades nativas aquí evaluadas algunas de ellas formaron hasta 20 o 24 flores por racimo, como las variedades C-267 y M-430 que produjeron 160 y 154 flores por planta (en promedio hasta el séptimo racimo) respectivamente, a diferencia de los híbridos comerciales DRD-8551 y El Cid, los cuales formaron un promedio de 85 y 77 flores por planta hasta el séptimo racimo, respectivamente (Cuadro 1.4). En cuanto a las demás variedades nativas, cuatro de ellas igualaron a los híbridos comerciales (O-427, P-445, M-12 y P-256), y solamente dos variedades nativas quedaron por debajo del rango de las variedades híbridas (P-257 y O-427×P-445).

Un aspecto a destacar de esta evaluación, es que el híbrido experimental generado a partir de dos variedades nativas (O-427×P-445), presentó un promedio mucho menor de flores que las variedades nativas de las que se derivó, con un promedio de 49 flores por planta que equivale a siete flores por racimo. Esta disminución en el número de flores se atribuye al cambio en el tipo de ramificación del racimo, el cual fue con un raquis principal sin bifurcaciones, parecido al tipo de ramificación de los racimos de los materiales comerciales.

Carrillo-Rodríguez *et al.* (2013) evaluaron 29 variedades nativas de tomate, 27 de ellas provenientes del estado de Oaxaca y dos de Guanajuato, y encontraron que el número de flores por racimo de estas variedades fluctuó en el rango de 5 a 13 flores. De igual manera, en el estudio de Gaspar-Peralta *et al.* (2012), en el que evaluaron ocho líneas avanzadas de tomate, el rango se mantuvo de 5 a 13 flores por racimo. En contraste, en este experimento el rango para esta variable fue de 7 a 22 flores por racimos, más amplio que el encontrado en los estudios arriba mencionados.

Número de frutos. La relación entre número de flores por racimo y número de frutos determina el porcentaje del cuajado de frutos (Carrillo-Rodríguez *et al.*, 2013). Las variedades aquí estudiadas presentaron diferencias significativas para el número de frutos ($P \leq 0.05$). Las variedades que produjeron mayor número de frutos fueron M-430 y O-427, con 119.0 y 110.5 frutos por planta respectivamente (Cuadro 1.4). En cambio, la variedad C-267 que presentó el mayor número de flores, debido al bajo porcentaje de cuajado (60 %), no fue la que formó el mayor número de frutos; aun así, superó a los híbridos comerciales DRD-8551 y El Cid que tuvieron un promedio de 72.5 y 68.5 frutos, respectivamente.

Cuadro 1.4. Comparación de medias para las variables de número de flores y frutos, peso de fruto y racimos en plantas de siete variedades de tomates nativos, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales.

Variedades	Rendimiento por planta (kg/ planta) al cuarto racimo	NFP	NFRP	PIF (g)	PR (g)
DRD 8551	4.18 b ± 0.14	85.5 c ± 7.51	72.5 c ± 4.51	157.0 b ± 16.15	1044.8 b ± 69.1
CID	4.15 b ± 0.21	77.2 cd ± 1.71	68.5 c ± 4.36	116.4 cde ± 6.96	1038.6 b ± 99.96
C-267	1.97 e ± 0.06	160.0 a ± 6.38	97.0 b ± 2.45	79.3 f ± 7.31	491.8 e ± 41.87
O-427	3.07 d ± 0.09	142.0 b ± 6.93	110.5 a ± 3.70	113.3 de ± 19.01	767.5 d ± 65.95
P-445	3.93 b ± 0.07	70.5 de ± 5.45	57.50 d ± 2.52	133.0 c ± 22.77	983.5 b ± 85.37
M-430	3.49 c ± 0.12	154.2 ab ± 7.41	119.0 a ± 8.49	105.4 e ± 13.27	872.1 c ± 58.7
M-12	1.19 f ± 0.02	88.5 c ± 4.04	69.2 c ± 3.77	32.6 g ± 3.84	296.6 f ± 17.98
P-256	4.59 a ± 0.13	89.2 c ± 8.18	78.5 c ± 3.42	131.8 c ± 13.6	1147.5 a ± 95.79
P-257	3.95 b ± 0.22	57.5 ef ± 5.32	37.0 e ± 4.32	253.2 a ± 24.49	988.6 b ± 134.36
O-427×P-445	2.99 d ± 0.17	49.2 f ± 4.92	44.0 e ± 5.10	126.8 cd ±	747.4 d ± 73.96
DSH (0.05)	0.33	14.63	10.99	17.51	90.12

NFP: número de flores por planta al séptimo racimo. NFRP: número de frutos por planta al séptimo racimo. PIF: peso individual de frutos. PR: peso de racimo hasta el cuarto racimo. DSH: diferencia significativa honesta Medias con la misma letra en las columnas no tienen diferencias significativas entre variedades (Tukey, 0.05).

En su estudio de tres variedades avanzadas de tomate procedente de variedades nativas tipo costilla, Urrieta-Velázquez *et al.* (2012) reportaron promedios de 47.2 a 64.7 frutos por planta (contados hasta el quinto racimo). La mayoría de las variedades aquí evaluadas se encuentran en el rango reportado por estos autores, y algunas variedades nativas produjeron hasta 119 frutos por planta, contados hasta el séptimo racimo lo que equivale a unos 85 frutos por planta al quinto racimo.

Peso individual de frutos y de racimo. El peso individual de frutos fluctuó ampliamente, de 32.6 a 253.2 g, donde la variedad M-12 del tipo “Cherry” presentó el peso más bajo en comparación con todas las demás variedades, en contraste con los frutos de la variedad P-257 que presentaron el peso más alto (Cuadro 1.4). Los frutos de las variedades nativas O-427, P-445, M-430 y P-256, y del híbrido experimental O-427×P-445, resultaron estadísticamente iguales a los del híbrido comercial El Cid, pero inferiores al del híbrido DRD-8551. Los pesos de fruto reportados por Urrieta-Velázquez *et al.* (2012) en variedades del tipo costilla son inferiores al de los frutos de las variedades nativas aquí evaluadas. A este respecto, Meitei *et al.* (2014) consideran que el peso y diámetro de fruto son dos de los principales criterios de selección para mejorar el rendimiento en los cultivos.

El peso del racimo depende de dos componentes importantes: peso individual del fruto y número de frutos por racimo. Para el peso de racimo se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre las variedades. La variedad nativa P-256 presentó el mayor peso de racimo (1147.5 g) en comparación con las demás variedades, incluidos los híbridos comerciales (DRD 8551 = 1044.8 g, y El Cid = 1038.6 g). Por su parte, las variedades nativas P-445 y P-257 obtuvieron valores estadísticamente iguales a los híbridos comerciales (983.5 g y 988.6 g, respectivamente). Urrieta-Velázquez *et al.* (2012) reportaron que los pesos de racimo en selecciones nativas del tipo costilla

oscilaron entre 410 y 690 g, mientras que en este estudio el rango alcanzó un límite más alto al fluctuar de 491.8 a 1147.5 g.

Rendimiento. Al considerar que tanto el número de frutos como el peso de frutos son los componentes que intervienen directamente en el rendimiento, se puede explicar que a pesar de que la variedad nativa P-257 produjo los frutos de mayor peso (253.2 g), también fue la variedad que formó el menor número de frutos por planta, por lo cual su rendimiento fue bajo (Cuadro 1.4). En cambio, la variedad nativa P-256 que obtuvo el rendimiento más alto con 4.5 kg por planta, valor que superó ($P \leq 0.05$) al de los híbridos comerciales, cuyos rendimientos fueron de 4.1 kg/planta para DRD-8551 y de 4.1 kg/planta para El Cid. Las variedades nativas P-445 y P-257 igualaron estadísticamente ($P \leq 0.05$) en rendimiento a los híbridos comerciales con promedios de 3.9 y 3.9 kg/planta respectivamente.

El rendimiento aquí registrado en todas las variedades nativas evaluadas (excepto la variedad M-12), fue mayor que el de las tres variedades nativas de tipo costilla evaluadas por Urrieta-Velázquez *et al.* (2012), cuyos rendimientos por planta oscilaron entre 2.08 y 3.49 kg al quinto racimo. En variedades nativas de tomate, Vásquez-Ortiz *et al.* (2010) reportaron rendimientos de fruto de 0.782 a 2.07 kg/planta, menores a los encontrados en este experimento.

1.7 CONCLUSIONES

Aunque en el presente estudio solamente se compararon siete variedades nativas mexicanas, varias de ellas mostraron potencial para ser utilizadas directamente en sistemas intensivos de producción mediante el manejo en un sistema hidropónico, ya que presentaron valores similares a los de híbridos comerciales en cuanto al rendimiento de fruto, que es un factor importante que los productores consideran al momento de establecer un cultivo. En adición, todas las variedades nativas aquí evaluadas igualaron al híbrido comercial usado como testigo en desempeño

fisiológico medido en tasa instantánea de fotosíntesis neta y contenido de clorofila foliar. También es de destacar que algunas variedades nativas superaron a los híbridos comerciales en número de flores y frutos, lo que resalta su potencial para obtener altos rendimientos y como candidatas a ser utilizadas como progenitoras en programas de mejoramiento genético de tomate.

1.8 LITERATURA CITADA

- Bai, Y. and P. Lindhout. 2007. Domestication and breeding of tomatoes: what have we gained and what can we gain in the future? *Annals of Botany* 100: 1085–1094. doi:10.1093/aob/mcm150.
- Carrillo-Rodríguez, J. C., J. L. Chávez-Servia, G. Rodríguez-Ortiz, R. Enríquez-del Valle y Y. Villegas-Aparicio. 2013. Variación estacional de caracteres agromorfológicos en poblaciones nativas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6: 1081–1091.
- Gaspar-Peralta, P., J. C. Carrillo-Rodríguez, J. L. Chávez-Servia, A. M. Vera-Guzmán, y I. Pérez-León. 2012. Variación de caracteres agronómicos y licopeno en líneas avanzadas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Phyton* 81: 15–22.
- Maldonado-Peralta, R., P. Ramírez-Vallejo, V. A. González Hernández, F. Castillo-González, M. Sandoval-Villa, M. Livera-Muñoz y N. Cruz-Huerta. 2016. Riqueza agronómica en colectas mexicanas de tomates (*Solanum lycopersicum* L.) nativos. *Agroproductividad* 9: 68-75.
- Meitei, K. M., G C Bora, S. J. Singh, and A. K. Sinha. 2014. Morphology based genetic variability analysis and identification of important characters for tomato (*Solanum lycopersicum* L.) *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science* 14: 1105–1111. doi: 10.5829/idosi.aejjaes.2014.14.10.12434.

- Rezende-Fontes, P. C. and C. De Araujo. 2006. Use of a chlorophyll meter and plant visual aspect for nitrogen management in tomato fertigation. *Journal of Applied Horticulture* 8: 8–11.
- Sandoval-Villa, M., C. W. Wood, and E. A. Guertal. 2002. Tomato leaf chlorophyll meter readings as affected by variety, nitrogen form, and nighttime nutrient solution strength. *Journal of Plant Nutrition* 25: 2129–42. doi:10.1081/PLN-120014065.
- SIAP. (2016). Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON). Consultado en: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp
- Song, Y., C. Jiang, and L. Gao. 2016. Polychromatic supplemental lighting from underneath canopy is more effective to enhance tomato plant development by improving leaf photosynthesis and stomatal regulation. *Frontiers in Plant Science* 7: 1–14. doi:10.3389/fpls.2016.01832.
- Torres, A., E. Campostrini, J. De Oliveira and R. E. Bressan-Smith. 2005. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and Spad-502 readings in coffee leaves. *Scientia Horticulturae* 104: 199–209. doi: 10.1016/j.scienta.2004.08.013.
- Urrieta-Velázquez, J. A., M. N. Rodríguez-Mendoza, P. Ramírez-Vallejo, G. A. Baca-Castillo, L. M. Ruiz-Posada, y J. A. Cueto-Wong. 2012. Variables de producción y calidad de tres selecciones de jitomate de costilla (*Solanum lycopersicum L.*). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 18: 371–81. doi: 10.5154/r.rchsh.2010.05.016.
- Vásquez-Ortiz, R., J. C. Carrillo-Rodríguez y P. Ramírez-Vallejo. 2010. Evaluación morfo-agronómica de una muestra del jitomate nativo del centro y sureste de México. *Naturaleza y Desarrollo* 8 :49-64.

Capítulo II. Calidad postcosecha de frutos de tomate nativo mexicano

2.1 RESUMEN

Debido a la aparente variabilidad disponible en los tomates nativos de México (*Solanum lycopersicum* L.) en cuanto a los compuestos involucrados en la palatabilidad de los frutos y en los procesos fisiológicos durante la maduración de los frutos, el objetivo de este experimento fue cuantificar las diferencias entre los compuestos primarios que determinan el sabor en los frutos de tomate, y en los procesos relacionados con el comportamiento del fruto durante la maduración, como las tasas de respiración y de pérdida de peso, entre variedades nativas de tomate mexicano. En cuatro frutos en estado rojo maduro de cada material genético se midió la firmeza, el tamaño de fruto, el contenido de sólidos solubles, la acidez titulable y la actividad antioxidante, en tanto que la pérdida de peso y la tasa de respiración se midieron en cuatro frutos cosechados desde el estado verde maduro (“breaker”) hasta el estado rojo maduro. Se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre variedades para todas las variables evaluadas calidad postcosecha, lo que muestra la diversidad genética de las variedades estudiadas. En contenido de sólidos solubles totales (SST), el híbrido experimental O427xP445 fue mayor que todas las variedades y que los testigos. Cinco variedades nativas también superaron a los híbridos comerciales en SST, mientras que en acidez sólo la variedad local P-256 fue significativamente mayor al resto. Los frutos de las variedades nativas presentaron alta tasa de respiración en el día cero (en etapa “breaker”), para luego ir disminuyendo durante la maduración del fruto; los híbridos comerciales mostraron una baja intensidad respiratoria en el día cero, que luego también disminuyó progresivamente durante la maduración del fruto. Siete variedades nativas igualaron al híbrido comercial El Cid en pérdida de peso durante la maduración del fruto; aunque todas las variedades nativas tuvieron mayores pérdidas que las del híbrido comercial DRD 8551. En firmeza, las variedades nativas presentaron valores menores que los híbridos comerciales, con excepción de P257 y del híbrido experimental O427xP445.

Palabras clave: Tomates nativos, calidad, características organolépticas, respiración, azúcares.

2.2 ABSTRACT

Considering the apparent variability among native tomato varieties (*Solanum lycopersicum* L.) regarding the compounds involved in the fruit palatability, and on the physiological processes during their ripening process, this study was done in order to quantify the primary compounds that determine the tomato fruits flavor and their ripening physiological behavior such as the rates of respiration and weight loss, in native varieties of Mexican tomatoes. The traits measured were firmness, fruit size, soluble solids content, titratable acidity, and antioxidant activity, that were recorded in four ripe, red fruits in each genetic material. Weight loss and respiration rate were monitored in four fruits from the breaker state until they turned red. Significant differences were found ($P \leq 0.05$) for all evaluated postharvest quality and yield variables, thus showing the genetic diversity on these traits among the studied tomato varieties. In yield, the local variety P-256 overrated all other varieties, including the controls, and the native cultivars P-445 and P-257 were statistically higher than the commercial hybrids used as controls. In total soluble solids content (TSS), the experimental hybrid O-427×P-445 was higher than all varieties, and five native varieties were also higher than the controls. For acidity only, the local variety P-256 was significantly higher than the rest. In fruit respiration the native varieties showed higher rates than the controls on day zero (breaker stage), and thereafter decreased as fruit were ripening. Commercial hybrids showed low respiration rates on day zero and then decreased progressively during the ripening of the fruit. Regarding the fruit weight loss during ripening, seven native varieties had the same losses as the El Cid commercial hybrid, but the DRD hybrid had lesser losses than the other genotypes. In firmness, most of the native varieties had lower values than controls, with the exception of local landrace P-257 and the experimental hybrid O-427×P-445.

Key words: Native tomatoes, quality, organoleptic traits, respiration, sugars.

2.3 INTRODUCCIÓN

El fruto de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es ampliamente cultivado y consumido en todo el mundo como un producto fresco o procesado. La calidad del fruto es una combinación de atractivos visuales como tamaño, forma y color, y de estímulos sensoriales como dulzor, acidez y textura. Usualmente el tomate se consume en su máxima calidad organoléptica que se presenta cuando el

fruto ha adquirido por completo el color rojo, pero antes de tener un ablandamiento excesivo (Casierra-Posada y Aguilar-Avendaño, 2008). El tomate se considera un fruto climatérico, en el que la maduración se acompaña de un aumento de la respiración y de la producción de etileno, lo que implica una serie de cambios fisicoquímicos como el ablandamiento y la evolución del color (Dominguez *et al.*, 2016).

El sabor del tomate está determinado en gran medida por el balance entre el contenido de sólidos solubles totales (que es una medida indirecta del contenido de azúcares) y la composición ácida del fruto (Žnidarčič y Požrl, 2006). El contenido de sólidos solubles totales (SST) es un índice refractométrico que indica la proporción (%) de sólidos disueltos en una solución. Es la suma de azúcares (sacarosa y hexosas, 65%), ácidos (citrato y malato, 13%) y otros componentes menores (fenoles, aminoácidos, pectinas solubles, ácido ascórbico y minerales) en la pulpa de tomate (Beckles, 2012).

La fructosa y la glucosa son las principales formas de azúcar y el ácido cítrico es el ácido dominante en el fruto maduro, aunque el ácido málico también está disponible en cierta medida (Panthee *et al.*, 2013). El color rojo es el resultado de la degradación de la clorofila, así como de la síntesis de licopeno (Fraser *et al.*, 1994). El amplio uso de la pasta de tomate como colorante hace que el licopeno sea un pigmento natural comercialmente importante (Shi *et al.*, 2000).

Hasta hace poco, la calidad organoléptica no era el objetivo principal de los mejoradores de tomate, ya que primero mejoraron el rendimiento, la adaptación a condiciones de crecimiento específicas, las resistencias a enfermedades y la vida útil del fruto (Causse *et al.*, 2010). Se ha señalado que características de calidad como sabor, firmeza y vida de anaquel, en frutos de variedades híbridas que actualmente se encuentran en el mercado, no satisfacen a los consumidores, porque estos frutos tienen excesiva firmeza y son pobres en sabor, aunque tienen

larga vida de anaquel (Causse *et al.*, 2010). La firmeza del fruto de tomate es crucial para la aceptación del consumidor, la vida útil y la transportabilidad; esta característica depende de varios factores, como el genotipo, las condiciones de crecimiento, las condiciones de cosecha y postcosecha (Aurand *et al.*, 2012).

Con el fin de combinar el sabor con otros rasgos deseables de calidad de fruto en cultivares mejorados, es importante determinar la variabilidad que existe en los compuestos cruciales que más contribuyen al sabor. Por ello el objetivo de esta investigación fue cuantificar las diferencias entre los compuestos primarios que determinan la palatabilidad en los frutos de tomates nativos mexicanos, en comparación con frutos de híbridos comerciales.

2.4 HIPÓTESIS

- Existen variedades nativas de tomate mexicano que poseen mejores características de calidad organoléptica que las variedades híbridas comerciales.
- Hay variedades nativas que tienen igual o menor actividad metabólica durante la maduración del fruto porque tienen iguales o menores tasas de respiración y de pérdida de peso durante la maduración del fruto, por lo que los primeros podrían tener igual o mayor vida de anaquel que los híbridos comerciales.

2.5 MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Se evaluaron siete variedades nativas de tomate mexicano procedentes de cuatro estados: Puebla (P-445, P-256 y P-257), Campeche (C-267), Oaxaca (O-427) y Estado de México (M-430 y M-

12), más un híbrido experimental O-427×P-445 formado a partir de dos variedades nativas, y dos híbridos comerciales (DRD-8551 y El Cid) como testigos de referencia.

Diseño experimental

Para la evaluación estadística de las variedades de tomate aquí estudiadas, se empleó un diseño experimental completamente al azar con 10 tratamientos (variedades de tomate). Para las variables de calidad en frutos la unidad experimental consistió en un (1) fruto (una repetición). Para las variables medidas en pasta, la unidad experimental consistió en 100 mL (una repetición) extraída de cuatro frutos en estado maduro.

Variables

Sólidos solubles totales (SST, °Bx). Los sólidos solubles totales se midieron en el jugo de frutos molidos, con un refractómetro digital (Hanna Instruments; modelo HI 96812, USA). Los resultados obtenidos de las lecturas se expresaron en grados Brix (°Brix).

Acidez titulable. La acidez titulable (porcentaje de ácido cítrico) se evaluó con el método indicado por la AOAC (1990). Se tomó una alícuota de 10 mL de jugo a la que se adicionaron tres gotas de fenoftaleína para su titulación con NaOH 0.1 N. El porcentaje de acidez se expresó como contenido de ácido cítrico, el cual se calculó mediante la Ecuación (2.1).

$$\text{Ácido cítrico (\%)} = \frac{[V_{\text{NaOH}} (\text{mL}) \times N_{\text{NaOH}} (\text{meq/mL}) \times 0.064 (\text{meq de ácido cítrico g/meq})]}{V_{\text{de jugo}} (\text{mL}) \times (100)} \dots (\text{Ec. 2.1})$$

Donde: V_{NaOH} = volumen de hidróxido de sodio gastado; N_{NaOH} = normalidad de la solución de hidróxido de sodio; $V_{\text{de jugo}}$ = volumen del jugo utilizado

Índice de madurez. El índice de madurez se calculó como el cociente entre el contenido de sólidos solubles totales entre el porcentaje de ácido cítrico (Beckles *et al.*, 2012).

pH. El pH se determinó por cuadruplicado mediante un potenciómetro (Conductronic, PC18, México) a partir de una muestra de jugo de cuatro frutos molidos de cada variedad.

Contenido de azúcares. La cuantificación de azúcares reductores (glucosa y fructosa) se hizo con base en la metodología propuesta por Darnell *et al.* (1994), con las modificaciones que se describen a continuación. Las muestras utilizadas procedieron de cinco frutos colectados al azar, que se cortaron en trozos pequeños y se mezclaron. De esta mezcla se tomaron diferentes muestras que se liofilizaron por 72 h. De las muestras liofilizadas se pesaron 0.5 g (materia seca), cantidad que se pulverizó hasta obtener un polvo fino. Posteriormente el polvo se trasladó a un tubo cónico de centrífuga de 50 mL y se le añadió 10 mL de metanol 80 %, y se dejó incubar en baño María a 70 °C por 10 min. Después, el sobrenadante se separó a otro tubo y este procedimiento se repitió dos veces más.

Los sobrenadantes resultantes se unieron en uno solo tubo y se midió el volumen colectado; el residuo sólido se desechó. Al volumen colectado se le adicionaron 100 µL de manitol (Sigma®) a una concentración de 100 mg mL⁻¹ como estándar interno. De esta mezcla se tomó una alícuota de 5 mL y se transfirió a un tubo de centrifugación de 15 mL y, se le agregó 3 mL de cloroformo; esta mezcla se agitó en vórtex (Scientific Industries, Genie-2, USA) por 2 min y posteriormente se centrifugó a 2000 ×g durante 5 min a 4 °C.

Se colectó la fase acuosa y se desechó la fase orgánica. Luego se adicionó 50 mg de polivinil polipirrolidona (PVPP) (Sigma®); se agitó en el vórtex durante 1 min y se centrifugó a 3000 ×g durante 10 min a temperatura ambiente. Se decantó el sobrenadante y se hizo otra extracción a la PVPP después de añadir 2 mL de agua desionizada (18 mOhm). Se centrifugó a 3500 ×g por 15

min. Los sobrenadantes que se colectaron se combinaron y se llevaron a congelación a -20 °C durante 12 h. El extracto congelado se llevó a liofilización por 48 h, luego se almacenó a -20 °C. El extracto obtenido se resuspendió en 3 mL de agua desionizada (18 mOhm) y se hizo pasar por resinas de intercambio iónico Dowex-1 y Dowex-50 (Sigma®).

Posteriormente, se inyectaron 20 µL del extracto resultante en un cromatógrafo de líquidos (Agilent 1100 HPLC, Germany). Se utilizó una columna de 30 cm × 7.8 mm × 9 µm, y como fase móvil se usó agua desionizada (18 mOhm) a un flujo de 0.5 mL. El tiempo de análisis de cada muestra fue de 25 min.

La concentración de azúcares solubles se determinó de acuerdo con las curvas patrón que se prepararon con soluciones estándar de 0.01, 0.1, 0.5 y 1 mg/mL de glucosa, fructosa y manitol (Sigma ®). De cada estándar se pesó 100 mg y se disolvió en 10 mL de agua desionizada; luego se hicieron las respectivas diluciones. Los cálculos para determinar la cantidad de azúcar (mg/g) se hicieron de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

$$\% \text{ de recuperación} = \frac{\text{concentración de manitol (mg)} \times \text{volumen total (mL)}}{10 \text{ mg de manitol}} \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.2})$$

$$\text{Azúcar} = \frac{\text{concentración del azúcar (mg)} \times \text{volumen total (mL)}}{\% \text{ de recuperación} \times \text{material vegetal (mg)}} \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.3})$$

Tamaño de fruto e índice de redondez. Se registró el diámetro polar y ecuatorial de cuatro frutos maduros por racimo, hasta el cuarto racimo. Para estas mediciones se utilizó un vernier digital marca Truper 14388®. A partir de estas mediciones se calculó el índice de redondez (*IR*), el cual define la forma del fruto, y corresponde a la relación entre el diámetro ecuatorial (*De*) y diámetro polar (*Dp*) (Ec. 2.2).

$$IR = Dp/De \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.4})$$

Donde: IR = índice de redondez; Dp = diámetro polar; De = diámetro ecuatorial.

Firmeza de fruto. La resistencia a la penetración en el fruto se hizo mediante un medidor de textura (Stable Micro Systems, modelo TTA-XT2i, UK). Se utilizó una sonda esférica de 0.5 cm de diámetro y la medición se hizo en dos puntos extremos del eje ecuatorial de cada fruto, a una velocidad de pre-ensayo de 3 mm s^{-1} , de ensayo de 2 mm s^{-1} y a una distancia de deformación de 1 mm. Los resultados obtenidos se expresaron en Newtons (N).

Fuerza máxima y cohesividad de la pulpa de tomate. El análisis de fuerza máxima y cohesividad de la pulpa de tomate se hizo con un medidor de textura (Stable Micro Systems, modelo TTA-XT2i, UK) en muestras de 100 mL de pulpa de tomate. Se midió la fuerza a compresión con un disco acrílico de 35 mm de diámetro. Las velocidades de pre-ensayo, ensayo y post-ensayo fueron de 1 mm s^{-1} , con distancia de actuación 30 mm. La celda de carga utilizada fue de 5 kg. A partir de las curvas de fuerza vs. tiempo se determinó la fuerza máxima y la cohesividad de la pulpa de tomate para cada variedad. Se hicieron tres repeticiones por cada genotipo.

Tasa de respiración de frutos en postcosecha. La tasa instantánea de respiración de frutos completos se midió mediante la cuantificación del CO_2 liberado por el fruto durante el proceso de maduración en postcosecha. Se midió en cinco frutos desde el estado verde maduro (madurez fisiológica) de cada variedad, y cada fruto individual correspondió a una unidad experimental. Las mediciones se hicieron cada 2 d hasta que los frutos alcanzaron el estado rojo maduro (a los 12 d). Asimismo, se registró la pérdida de peso durante este periodo.

Durante el lapso de las mediciones, los frutos se mantuvieron a temperatura ambiente. Para esta cuantificación se utilizó un analizador de gases infrarrojo (LI-6400, LICOR, USA), acoplado a la cámara para medir CO_2 en suelo (Li-64009). Como en suelo esta cámara se cierra con el mismo suelo, para fruto la cámara se cerró con un tapón de PVC hecho en el laboratorio y un empaque de

neopreno, y con ello se logró evitar la interferencia del CO₂ atmosférico durante las mediciones. Los resultados obtenidos por cada medición fueron recalculados considerando el peso individual del fruto en cada lectura y el volumen ocupado por éste dentro de la cámara, como se muestra en la ecuación 2.3. La tasa respiratoria se expresó en $\mu\text{mol CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

$$Eflux = \frac{[dc/dt]*[Vc-Vf]}{\text{Peso del fruto}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.5})$$

Donde: Eflux = CO₂ liberado por el fruto; dc/dt = diferencial del CO₂ por la diferencial de tiempo (valor obtenido en las lecturas del equipo); V_c = volumen de la cámara; V_f = volumen del fruto

Pérdida de peso. Se cosecharon cinco frutos en estado de madurez verde maduro (madurez fisiológica) de cada variedad, y cada fruto correspondió a una unidad experimental. Los frutos se pesaron cada 2 días (durante 12 d) hasta que los frutos alcanzaron el estado rojo maduro, y la pérdida de peso se obtuvo por diferencia (%) entre pesos de días consecutivos.

Color. Se determinó mediante un colorímetro (Hunter Lab, modelo MiniScan EZ 4500L, USA), el cual proporciona los valores de color a través de la escala CIELAB. Las mediciones se hicieron con lecturas sobre la epidermis en la zona ecuatorial del fruto, de las cuales se obtuvieron los valores de L*, a* y b*; donde, L* representa la variación de brillantez o luminosidad, a* denota las tonalidades de verde a rojo; y b* los tonos de azul a amarillo. Posteriormente, con los valores de a* y b* se calculó el ángulo de matiz (Hue) [$H^\circ = \tan^{-1} (b^*/a^*)$] y el índice de saturación de color o cromaticidad [$C = (a^2 + b^2)^{1/2}$], de acuerdo con Gaspar *et al.* (2012).

2.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis estadísticos indicaron que las variedades presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) (Cuadro 2.1) para todas las variables de calidad evaluadas, por lo que estos resultados demuestran la variabilidad genética entre las variedades de tomate evaluadas.

Calidad postcosecha del fruto

Sólidos solubles totales, acidez e índice de madurez. El híbrido experimental O-427×P-445 fue el genotipo que presentó mayor contenido de SST (5.98 °Bx), seguido de cuatro de las demás variedades nativas, que también superaron a los híbridos comerciales (O-427, P-445, M-430 y M-12); las tres variedades nativas restantes (C-267, P-256 y P-257) resultaron estadísticamente iguales que los híbridos comerciales (Cuadro 2.2). En cuanto al porcentaje de ácido cítrico, el rango presentado por las variedades fue de 0.29 a 0.47 % de ácido cítrico (acidez titulable), rango en el que las variedades P-445 y M-12 fueron las que presentaron el menor contenido (0.29 % para ambas), en contraste con la variedad nativa P-256, que tuvo el mayor porcentaje (0.47 %) y estadísticamente fue igual que los híbridos testigo.

Cuadro 2.1. Descriptores estadísticos para las variables de calidad organoléptica evaluadas en frutos de siete variedades de tomates nativos, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales

Variable	Media general	DE	n	GL	R²	Valor-p	Min	Máx
SST (°Bx)	5.01	0.54	40	9	0.89	<0.0001	4.20	6.12
Ácido cítrico (%)	0.36	0.06	30	9	0.81	<0.0001	0.24	0.50
Índice de madurez	14.35	3.34	30	9	0.88	<0.0001	9.33	20.97
pH	4.4	0.13	40	9	0.88	<0.0001	4.12	4.63
Glucosa (mg/mL)	21.80	6.56	20	9	0.97	<0.0001	12.45	32.80
Fructosa (mg/ mL)	23.45	5.37	20	9	0.93	0.0001	13.91	34.34
Firmeza (N)	9.03	4.44	40	9	0.95	<0.0001	4.20	18.33
Diámetro polar (mm)	59.34	13.56	40	9	0.98	<0.0001	35.39	78.61
Diámetro ecuatorial (mm)	62.31	10.92	40	9	0.97	<0.0001	38.31	84.60
Índice de redondez de fruto	0.96	0.20	160	9	0.82	<0.0001	0.54	1.36
Fuerza máxima de pasta (gf)	83.00	28.59	30	9	0.71	0.0007	45.3	164.20
Cohesividad (gf/s)	1711.60	422.82	30	9	0.93	<0.0001	1153	2427.00

SST: sólidos solubles totales. DE: desviación estándar. GL: grados de libertad del modelo. n: número de observaciones. R²: coeficiente de determinación. Mín: valor mínimo. Máx: valor máximo.

Cuadro 2.2. Comparación de medias para las variables organolépticas en siete variedades de tomates nativos un híbrido experimental y dos híbridos comerciales.

Variedad	SST (°Bx)	Ácido Cítrico (%)	IM	pH	Firmeza (N)	Glucosa (mg/g)	Fructosa (mg/g)
DRD 8551	4.6 cd ± 0.24	0.4 ab ± 0.06	11.7 de ± 2.4	4.2 de ± 0.05	15.3 a ± 1.09	179.3 cd ± 14.3	196.2 b ± 10.4
El Cid	4.3 d ± 0.13	0.39 ab ± 0.03	11.1 de ± 0.80	4.3 cd ± 0.04	9.9 bc ± 1.62	209.0 bc ± 9.2	214.6 b ± 9.8
C-267	5.0 bc ± 0.21	0.36 bc ± 0.03	14.1 cd ± 0.85	4.3 cd ± 0.04	4.8 e ± 0.57	128.8 def ± 20.5	174.0 bc ± 32.2
O-427	5.1 b ± 0.13	0.35 bc ± 0.03	15.0 bcd ± 1.36	4.4 abc ± 0.04	5.2 e ± 0.5	118.3 ef ± 15.1	160.6 bc ± 20.4
P-445	5.3 b ± 0.17	0.29 c ± 0.04	18.7 a ± 2.20	4.4 ab ± 0.02	7.1 de ± 1.9	102.4 f ± 16.9	114.4 c ± 22.5
M-430	5.2 b ± 0.13	0.4 ab ± 0.03	13.3 de ± 0.48	4.5 ab ± 0.07	5.5 de ± 1.01	204.8 bc ± 0.11	224.0 ab ± 6.6
M-12	5.4 b ± 0.39	0.29 c ± 0.01	19.1 a ± 1.61	4.4 bc ± 0.10	4.9 e ± 0.77	269.8 a ± 18.7	282.4 a ± 14.7
P-256	4.5 d ± 0.24	0.47 a ± 0.03	9.7 e ± 0.13	4.1 e ± 0.04	17.3 a ± 0.69	246.6 ab ± 9.45	184.5 b ± 3.8
P-257	4.4 d ± 0.17	0.34 bc ± 0.02	13.1 de ± 1.33	4.5 a ± 0.03	8.1 cd ± 0.73	163.7 cde ± 4.53	196.0 b ± 5.7
O-427 × P-445	5.9 a ± 0.15	0.34 bc ± 0.01	17.6 abc ± 0.67	4.4 abc ± 0.03	11.8 b ± 1.36	169.9 cde ± 5.52	182.0 b ± 12.3
DSH	0.50	0.09	3.98	0.12	2.69	51.8	64.19

SST: sólidos solubles totales. IM: índice de madurez. DSH: diferencia significativa honesta Medias con la misma letra en columnas no son significativamente diferentes (Tukey, 0.05).

Según Beckles (2012), el contenido de ácido cítrico influye directamente en la percepción del dulzor en los tomates, por lo que un alto contenido de SST (~5 %) combinado con un bajo contenido de ácido cítrico (~0.4 %), equivale a un índice de madurez aproximado de 12.5 que es considerado deseable, ya que se relaciona con la palatabilidad de los frutos de tomate para consumo en fresco. Además, Beckles *et al.* (2012) mencionaron que un alto contenido de SST puede reducir los costos asociados con el procesamiento industrial de tomate.

Como se muestra en el Cuadro 2.2, la mayoría de las variedades nativas tuvieron más de 5 % de SST, y en muchas de ellas el porcentaje de ácido cítrico es menor a 0.4 %, por lo que el índice de madurez para siete de las variedades nativas fue superior a 12.5. Destacan dos variedades locales P-445 y M-12 y el híbrido experimental O-427×P-445 porque presentaron altos índices de madurez (18.7, 19.1 y 17.69, numéricamente superiores al índice de los híbridos comerciales aquí evaluados que obtuvieron valores de 11.7 para el DRD 8551 y de 11.1 para El Cid. En el estudio hecho por Casierra-Posada y Aguilar-Avenidaño (2008), tres híbridos comerciales presentaron un índice de madurez en el rango de 8 a 10; es decir, fueron inferiores en palatabilidad a los híbridos y variedades nativas evaluadas en este experimento.

pH. Los valores de pH en los frutos de las variedades nativas en este experimento se mantuvieron entre 4.16 y 4.54, mientras que los híbridos evaluados obtuvieron valores de 4.25 y 4.36, pero sin diferencias estadísticas entre los híbridos estudiados y cuatro de las variedades nativas, aunque tres de éstas obtuvieron valores numéricamente mayores a los híbridos y sólo una de ellas tuvo un valor menor a éstos.

Al respecto, Benton (2007) considera que el rango óptimo de pH en frutos de tomate es de 4.0 a 4.5, debido a que cuanto menor es el pH mayor es la llamada acidez, un factor por el cual algunos consumidores juzgan la calidad de la fruta de tomate. En el estudio hecho por Degefa *et al.* (2012)

en nueve cultivares de tomate, éstos se encontraron en un rango de pH de 3.7 a 4.6, que es un rango más amplio que el de las variedades nativas evaluadas en este experimento. En el estudio de San Martín-Hernández *et al.* (2012) se reportó un rango de pH para el híbrido Caimán de 4.76 a 4.86, que es un rango superior al registrado en los materiales aquí evaluados. Con respecto a estas variaciones, Benton (2007) mencionó que el pH de los frutos puede ver se influenciado por factores externos a la planta, como clima, tipo de suelo o sustrato, y prácticas culturales.

Contenido de azúcares. La suma de los contenidos de glucosa y fructosa equivale aproximadamente a 50 % del contenido de la materia seca en los frutos de tomate. En el contenido de glucosa se observaron diferencias significativas entre las variedades, donde la nativa M-12 fue la de mayor contenido con 269.8 mg/g, seguida de la variedad P-256, y ambas superaron a los híbridos testigo (Cuadro 2.2). Las variedades nativas M-430, P-257 y O-427×P-445 igualaron a los híbridos comerciales, y sólo el resto presentó menor contenido de azúcares que éstos.

Para el contenido de fructosa, se encontró que la variedad M-12 de tipo ‘Cherry’ fue la que presentó la mayor cantidad de esta hexosa con 282.4 mg/g, y fue la única variedad nativa que superó a los híbridos comerciales. También se detectó que la variedad M-430 presentó alto contenido de fructosa en comparación con su contenido de glucosa, lo cual es relevante porque la fructosa tiene un poder edulcorante de casi el doble que la glucosa, por lo que fructosa se asocia con los frutos más dulces (Beckles *et al.*, 2012). Las demás variedades nativas fueron estadísticamente iguales a los testigos, con excepción de P-445, que fue inferior. En general, los frutos de cultivares de tomate se caracterizan por tener niveles casi equimolares de las dos hexosas, glucosa y fructosa, ya que son derivadas de la hidrólisis de la sacarosa translocada (Shammai *et al.*, 2018). Pero aquí se identificaron algunas variedades nativas que contienen más fructosa que glucosa.

En ocho variedades nativas de tomate mexicano, Vela-Hinojosa *et al.* (2018) mostraron que los genotipos nativos del tipo ‘Cherry’ fueron los que presentaron concentraciones superiores de estos azúcares, resultado que es similar a los obtenidos en este experimento. Al respecto, Beckles *et al.* (2012) mencionaron que existen diferencias en los pasos de la ruta metabólica de síntesis de hexosas en los frutos, que explican parcialmente los distintos perfiles de azúcar de los tomates silvestres y modernos. Estos autores también mencionan que hay dos modificaciones bioquímicas relacionadas con la importación de azúcar durante el desarrollo del fruto en especies de tomate silvestre, que son los cambios en la actividad de invertasa y cambios en la acumulación de almidón, donde la magnitud y la dirección de los cambios varían de una especie a otra.

Firmeza. En firmeza (resistencia a la deformación del tejido, N) los resultados aquí obtenidos muestran que los testigos fueron superiores a la mayoría de las variedades nativas, con excepción de la variedad P-256, que incluso fue superior a dichos testigos (Cuadro 2.2). Por su parte, la variedad P-257 y el híbrido experimental O-427×P-445 fueron estadísticamente iguales al híbrido El Cid, y las demás variedades nativas se ubicaron en un rango de 4.89 a 7.1 N. En las mediciones de firmeza hechas por Juárez-López *et al.* (2009) en siete variedades de tomate nativo mexicano, los autores reportaron un rango de 4.1 a 6.2 N mm⁻¹, que también evidencia que los tomates nativos son de menor firmeza que los híbridos comerciales.

Características físicas de la calidad del fruto

Tamaño de fruto (DP, DE, IR). En los frutos de las variedades nativas existe una gran diversidad de formas y tamaños. En el Cuadro 2.3 se muestran los valores promedio del diámetro polar y ecuatorial y el índice de redondez para los materiales evaluados. En estos tomates, la variedad P-257 fue la que produjo los frutos de mayor tamaño con respecto a las demás variedades, y la variedad P-445 produjo frutos de igual tamaño que los testigos; el resto de las variedades produjeron frutos de menor tamaño que los testigos.

Cuadro 2.3. Comparación de medias para las variables índice de redondez, diámetro polar y ecuatorial en frutos de tomate siete variedades de tomates nativos, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales.

Variedades	DP (mm)	DE (mm)	IR
DRD 8551	70.96 b ± 0.57	63.87 c ± 1.29	1.12 b ± 0.09
El Cid	71.47 ab ± 2.09	56.64 d ± 1.62	1.26 a ± 0.06
C-267	38.36 e ± 0.28	61.92 c ± 1.24	0.62 f ± 0.04
O-427	53.49 d ± 1.49	71.22 b ± 2.27	0.75 e ± 0.08
P-445	72.05 ab ± 1.21	61.92 c ± 2.57	1.17 ab ± 0.08
M-430	61.81 c ± 4.16	62.29 c ± 3.85	1.00 c ± 0.14
M-12	36.15 e ± 0.85	39.01 e ± 0.87	0.93 cd ± 0.06
P-256	53.96 d ± 1.55	60.97 cd ± 2.80	0.89 d ± 0.1
P-257	75.9 a ± 2.39	83.99 a ± 0.59	0.90 d ± 0.08
O-427×P-445	59.25 c ± 1.45	61.31 cd ± 1.39	0.97 cd ± 0.01
DSH	4.62	5.01	0.098

DP: diámetro polar (mm). DE: diámetro ecuatorial (mm). IR: índice de redondez ($IR = DP / DE$). DSH: diferencia significativa. Medias con la misma letra en las columnas no tienen diferencias significativas entre genotipos (Tukey, 0.05). Mediciones tomadas al séptimo racimo.

Carrillo-Rodríguez *et al.* (2013) clasificaron colectas de variedades nativas de tomate con base en el diámetro de sus frutos, y reportaron tamaños desde 1.35 hasta 7.19 cm de diámetro polar y desde 1.42 hasta 7.22 cm de diámetro ecuatorial, sus resultados, al igual que los del presente estudio, demuestran que la mayoría de los tomates nativos producen frutos de menor tamaño que los de los híbridos comerciales. Al respecto, Frary *et al.* (2000) consideran que la domesticación

es la principal causa del aumento en tamaño de fruto en las variedades nativas, y que estos cambios en tamaño han estado mediados por cambios en el genoma.

Debido a los procesos de selección tradicional y en muchos casos por selección natural en las variedades nativas, es que existe una gran variedad de tamaños y formas de fruto en los tomates nativos. Referente al cambio en tamaño, Tanksley (2004) postuló que la domesticación ocurrió en tiempos prehistóricos, por lo que nadie conoce la ruta evolutiva real a través de la cual las especies silvestres dieron lugar a plantas con frutos más grandes y de formas variables. El escenario más probable es que nuestros antepasados hayan seleccionado plantas con mutaciones que produjeron frutos más grandes, y las cuales gradualmente se fueron acumulando para dar lugar a los "frutos grandes" típicos de los cultivares actuales. El ancestro putativo silvestre del tomate cultivado, *S. lycopersicum* var. *cerasiforme*, produce frutos pequeños (de dos lóculos) que pesan sólo unos pocos gramos; en contraste, un solo fruto de una variedad moderna puede contener muchos lóculos y pesar hasta 1 kg, que equivale a un aumento de peso de casi 1000 veces.

Fuerza máxima y cohesividad de la pulpa. Entre los diferentes parámetros para medir la textura en un alimento, para este experimento se tomaron en cuenta dos factores primarios, la cohesividad y la fuerza máxima (dureza) de la pulpa de tomate, ya que estos valores son parte importante de las características reológicas de los alimentos.

Como se muestra en el Cuadro 2.4, no hubo diferencias en los valores de fuerza máxima de la pulpa entre las variedades nativas y los híbridos comerciales, variable en la que el valor numérico más alto lo obtuvo la variedad O-427. Tomando en cuenta que los valores de fuerza máxima se refieren a cantidad de fuerza necesaria para comenzar la deformación, este parámetro se puede relacionar directamente con la consistencia. Según Sánchez *et al.* (2003), la pasta de tomate con

una mayor consistencia puede conducir a un importante ahorro de costos en la producción de alimentos industrializados hechos a base de tomate.

Cuadro 2.4. Valores promedios para la fuerza máxima y cohesividad de la pulpa de tomate en siete variedades de tomates nativos, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales.

Variedades	FM (gf)	Cohesividad (gf/s)
DRD 8551	100.3 abcd ± 35.7	1560.67 bcd ± 102.2
El Cid	80.3 abcd ± 4.4	1687.67 b ± 57.0
C-267	48.5 d ± 3.1	1297.67 ef ± 61.0
O-427	121.83 a ± 36.8	2310 a ± 106.4
P-445	103.43 abc ± 23.9	2166.33 a ± 41.6
M-430	54.97 cd ± 9.0	1163.33 f ± 17.0
M-12	83.73 abcd ± 0.7	1366.67 def ± 104.2
P-256	70.36 abcd ± 1.8	1619.33 bc ± 67.2
P-257	108.53 ab ± 7.5	2308.67 a ± 42.0
O-427×P-445	58.03 bcd ± 2.7	1435.67 cde ± 46.1
DSH	53.20	204.58

FM: fuerza máxima. DSH: diferencia significativa honesta. Medias con la misma letra en las columnas no tienen diferencias significativas entre variedades (Tukey, 0.05). Un (1) gf es igual a 0.00980665 N.

En cuanto a la cohesividad, las variedades nativas O-427, P-445 y P-257 fueron superiores al resto de genotipos evaluados, mientras que las variedades M-12 y P-256 y el híbrido experimental O-427×P-445 presentaron valores iguales que los híbridos comerciales evaluados. La cohesión es una propiedad interna de la pasta de tomate, y es una medida de las fuerzas que mantienen las partículas unidas entre sí. Esta propiedad se relaciona con el parámetro de pegajosidad, propiedad importante al diseñar los mecanismos de procesamiento de los frutos (Goula *et al.*, 2007).

Según Barrett *et al.* (1998), existen numerosos factores que influyen en las características reológicas de la pasta de tomate, entre las que se encuentran: cultivar o variedad, estado de madurez a la cosecha, prácticas culturales, incluyendo uso y tipos de fertilizantes, aplicación de ciertas

hormonas, cantidad de agua, grado de exposición al sol y estrés ambiental en la planta anterior a la cosecha, como sequía, salinidad, agua, enfriamiento y estrés por congelación.

Cambios durante la maduración postcosecha del fruto

Pérdida de peso. Las pérdidas de peso en los frutos de las variedades aquí evaluadas oscilaron entre 4 y 13.5 % (Figura 2.1), rango en el que hubo diferencias varietales significativas ($P \leq 0.05$). En esta característica de calidad de fruto el híbrido DRD 8551 presentó la menor pérdida de peso, mientras que la variedad M-12 presentó la mayor pérdida de peso. En la mayoría de las variedades nativas el rango de pérdidas se mantuvo entre 5 y 8.3 %, y estadísticamente fueron iguales a el híbrido comercial El Cid, lo que indica que en esta variable hay tomates nativos que igualan al testigo comercial que perdió más peso.

Los resultados de Casierra-Posada y Aguilar-Avendaño (2008) muestran un rango de pérdida de peso de 10 a 17 % en variedades híbridas cosechadas en estado de madurez temprano (verde maduro) hasta alcanzar el color rojo; tal rango es superior al promedio encontrado en las variedades de tomate nativo y en los híbridos comerciales analizados en este experimento. Por su parte, Juárez-López *et al.* (2009) observaron que las variedades nativas tienden a perder peso más rápidamente que el híbrido comercial que emplearon como testigo, lo que también sucedió en algunos tomates nativos incluidos en el presente estudio.

Žnidarčič y Požrl (2006) proponen que la pérdida de peso en frutos de tomate depende de varios factores, como temperatura, humedad relativa y transpiración. Casierra-Posada y Aguilar-Avendaño (2008) agregan otros factores, como la relación área superficial-volumen del fruto, la naturaleza de la pared del fruto y el estado de madurez al momento del corte, que consideran los principales factores que intervienen en la pérdida de peso.

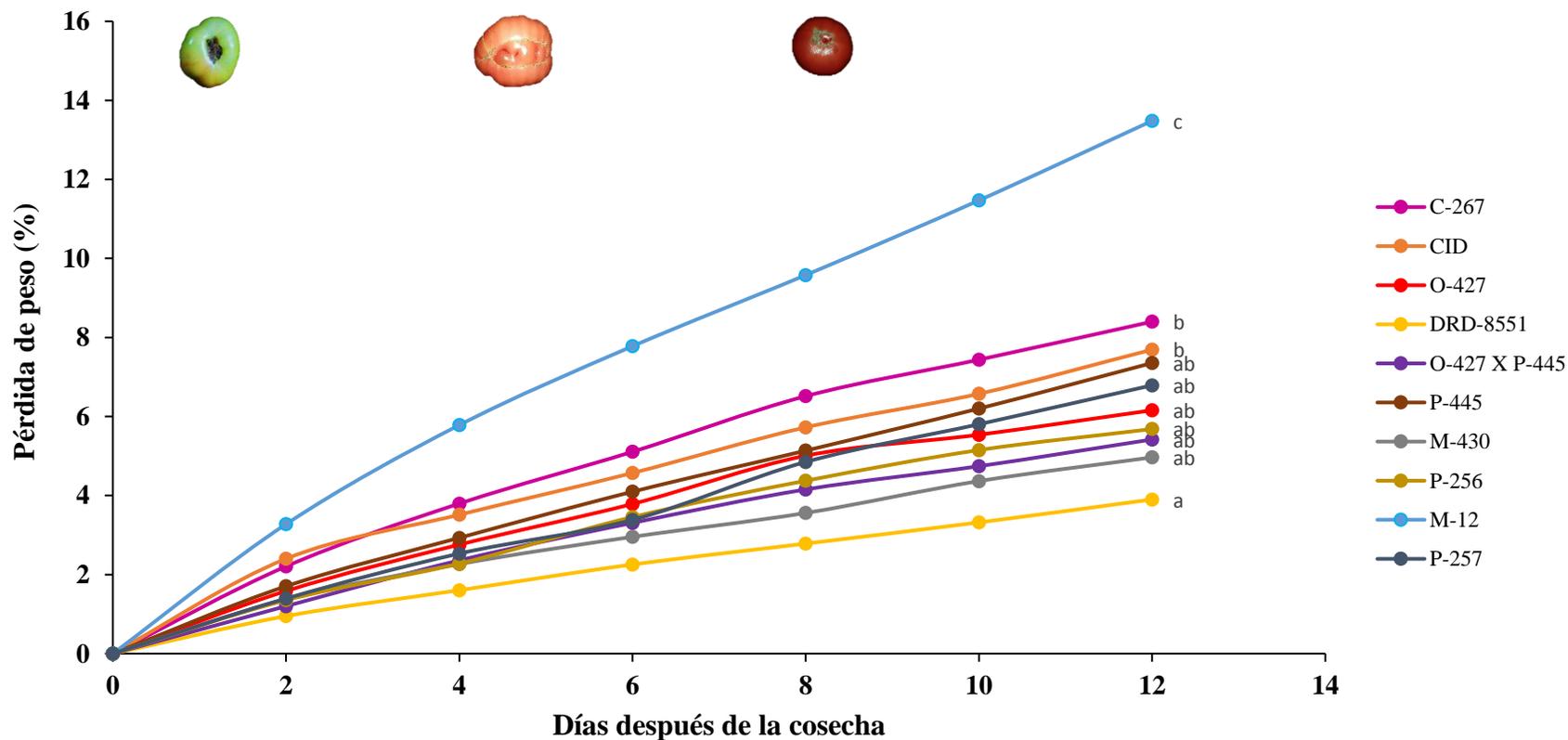


Figura 2.1. Porcentaje de pérdida de peso en frutos de tomates nativos y de dos híbridos comerciales (DRD-8551 y El Cid). Comparación de medias para los días 0 y 12. Letras iguales no tienen diferencias significativas entre genotipos (Tukey, 0.05). DSH para el día 12 = 3.77

Tasa de respiración. Todas las variedades de tomate aquí estudiadas presentaron un patrón similar en la tasa de respiración de sus frutos. De acuerdo con Van de Poel *et al.* (2014), este patrón corresponde a los frutos climatéricos en los cuales la tasa de respiración (producción de CO₂) es muy alta en el fruto en desarrollo para luego disminuir rápidamente durante la maduración, y además durante la maduración la tasa de respiración aumenta transitoriamente.

En la Figura 2.2 se puede observar que las variedades nativas tuvieron una tasa de respiración mayor al momento de corte (estado verde maduro) que los híbridos comerciales, que luego fue disminuyendo durante el tiempo de almacenamiento, con breves recuperaciones transitorias (picos) que se consideran picos del climaterio. Es importante señalar que la variedad nativa P-256 fue la única que presentó el patrón de respiración más cercano al de los híbridos comerciales. De igual manera, las variedades nativas M-430, P-257 y el híbrido experimental O-427×P-445 fueron estadísticamente iguales al híbrido El Cid al inicio y al final de las mediciones.

En las mediciones hechas en el día 12 (al final de la maduración), no se encontraron diferencias significativas entre el híbrido El Cid y la mayoría de variedades nativas, salvo en el caso de la variedad C-267 que fue la variedad que mayor tasa de respiración tuvo durante todo el experimento. En la mayoría de las variedades el pico climatérico, de acuerdo al incremento en la tasa de respiración durante la maduración, ocurrió en el día 4, mientras que en las variedades C-267 y O-427 el pico climatérico se observó al día 6, y en la variedad P-445 no se pudo identificar tal estado. Las curvas de respiración obtenidas en este experimento fueron similares a la encontrada por Kandasamy *et al.* (2015) en tomates del cv. Roma, en el que también se encontró que la temperatura juega un papel importante en la tasa de respiración, ya que la intensidad respiratoria aumenta con el calor.

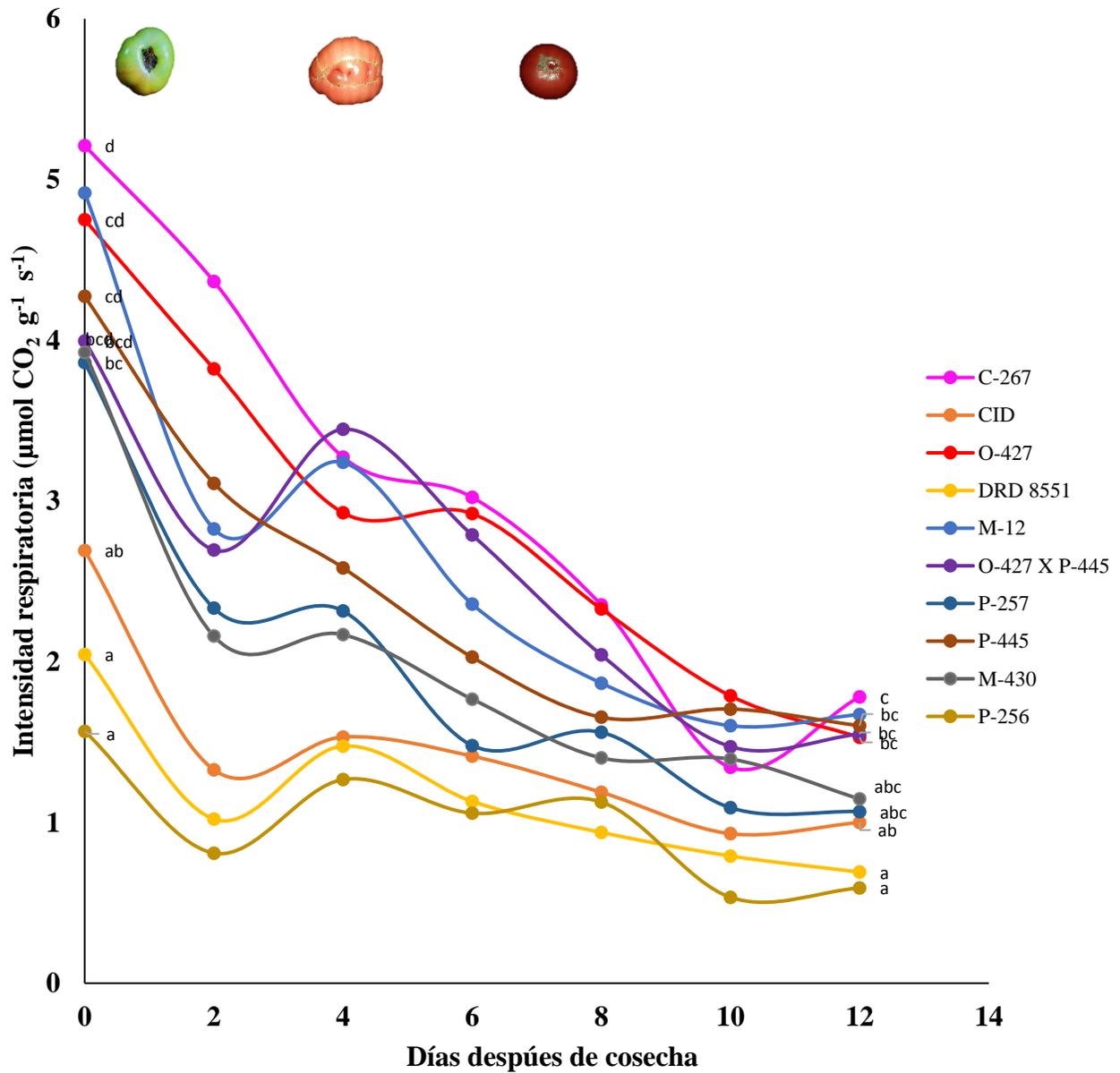


Figura 2.2. Cambios en la tasa de respiración durante la maduración de frutos de tomates nativos mexicanos, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales (DRD-8551 y El Cid). Letras iguales indican medias sin diferencias significativas entre variedades (Tukey, 0.05). DSH para el día 0 = a 1.5. DSH para el día 12 = 0.72.

Color. En este experimento se observó que la luminosidad de los frutos presentó una tendencia similar en todas las variedades (Figura 2.3), ya que la disminuyó conforme los tomates alcanzaron el color rojo, que según López-Vidal *et al.* (2014) es debido al incremento en el contenido de licopeno.

Los valores de Hue (ángulo de matiz) disminuyeron progresivamente durante la maduración del fruto, lo que indica el cambio de verde a rojo que ocurre durante el proceso de maduración es debido a la acumulación de pigmentos. De acuerdo con Cantwell (2000), existe correlación entre la disminución del valor de Hue y el incremento en el contenido de licopeno durante la maduración de los frutos. En cuanto al valor de croma (saturación de color), las variedades se mantuvieron dentro del rango de 25 a 40 unidades durante la maduración, lo que concuerda con los valores reportados por Cantwell (2000) en variedades comerciales de tomate, y con los reportados por Vela-Hinojosa *et al.* (2018) en variedades nativas de tomate mexicano.

El cambio en el color de los frutos de tomate durante maduración se debe en gran parte a la presencia de diversos carotenoides (β -caroteno, licopeno, luteína, etc.). El color de los frutos está condicionado por los tipos y concentraciones de carotenoides, características que están determinadas por la constitución genética y el ambiente (Weingerl y Unuk, 2015).

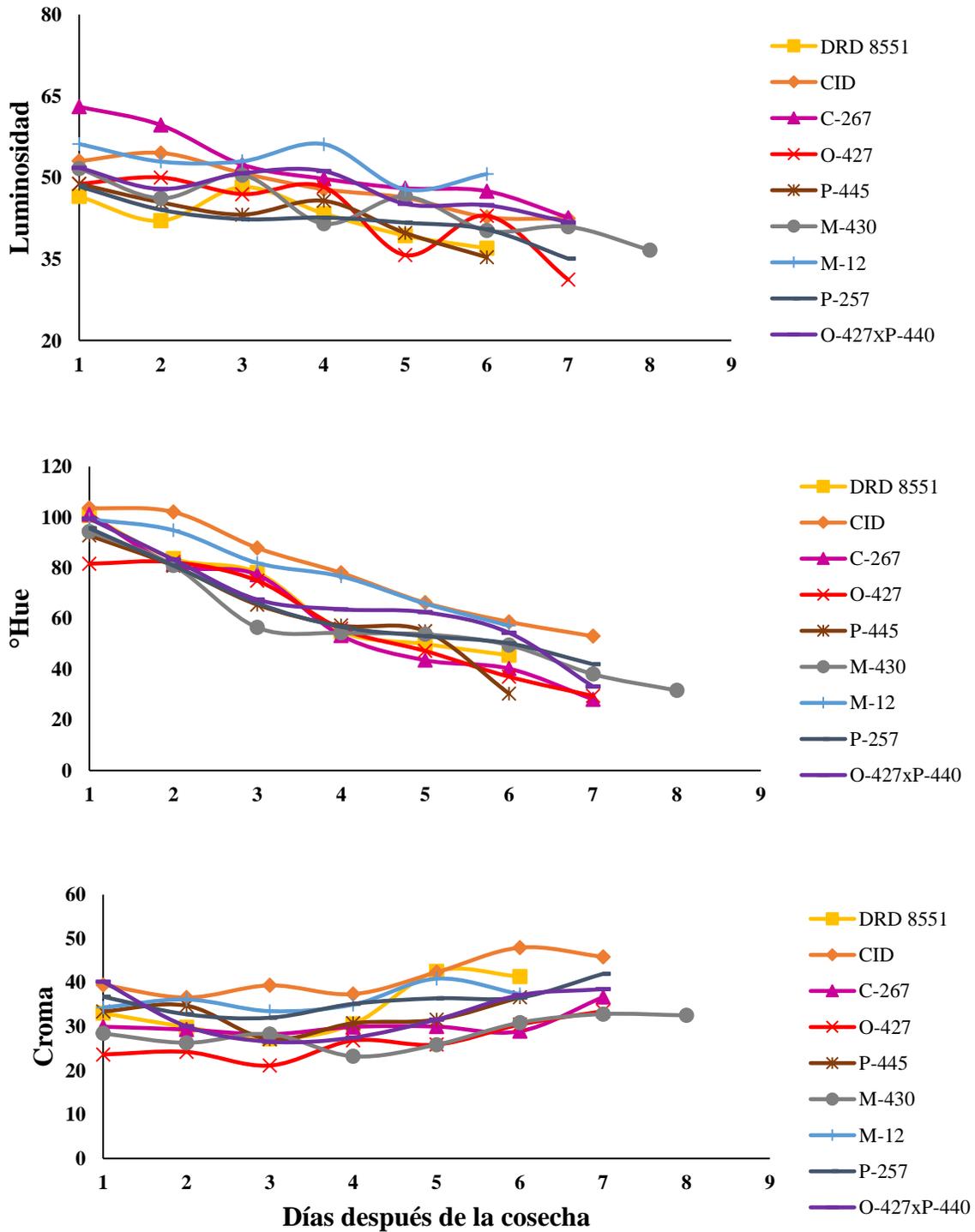


Figura 2.3. Medias de luminosidad, cromas y Hue de seis variedades de tomate nativo, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales.

2.7 CONCLUSIONES

Cuatro de las variedades nativas evaluadas (O-427, P-445, M-430, M-12) y el híbrido experimental (O-427×P-445) superaron a los testigos comerciales en el contenido de sólidos solubles. Entre los componentes principales del sabor se puede destacar que las variedades nativas presentaron un balance deseable entre el contenido de sólidos solubles y acidez, porque produjo un índice de madurez superior a 12.5, lo cual los hace de sabor más dulce y más atractivos para el consumo en fresco, en comparación con los híbridos comerciales, que obtuvieron un valor inferior al deseable para esta característica.

El híbrido experimental O-427×P-445 fue el de mayor contenido de sólidos solubles totales, lo que indica el potencial de hacer cruza entre estas variedades como parte de programas de mejoramiento, ya que este híbrido superó a las variedades nativas de las cuales se derivó, superioridad atribuible al llamado vigor híbrido o heterosis. En cuanto a los contenidos de glucosa y fructosa, la variedad M-12 (tipo 'Cherry') fue la que presentó la mayor concentración de estos azúcares, y a su vez una de las que obtuvo el mayor contenido de sólidos solubles totales.

En cuanto a tasa de respiración durante la maduración del fruto, en general, las variedades nativas mostraron una alta actividad metabólica al inicio de la maduración de los frutos, pero al final de este proceso su respiración fue similar a la de los testigos cuando alcanzan el estado de madurez rojo maduro.

Claramente las variedades nativas destacan en características de calidad sensorial, pero es necesario enfocar los trabajos de mejoramiento genético para mejorar sus características de firmeza y reducir su tasa de respiración, para así prolongar su vida postcosecha, ya que éstas son características de calidad importantes para el manejo comercial.

Con los presentes resultados se demuestra que varias variedades nativas aquí estudiadas tienen el potencial para ser utilizadas como fuente de germoplasma (progenitoras) que permitan producir híbridos comerciales con mejores características sensoriales, además de contar ya directamente con potencial para ser utilizadas en mercados locales o de nivel gourmet, e incluso destinarse a la industria del procesamiento industrial, como la elaboración de pastas, purés y jugos de tomate.

2.8 LITERATURA CITADA

- AOAC (Association of Official Analytical Chemists) (1990). Official method 985.33. vitamin C (reduced ascorbic acid) in ready-to-feed milk-based infant formula 2,6-Dichloroindophenol Titrimetric Method. *In: Official Methods of Analysis*, AOAC International, Washington DC. pp.1108-1109.
- Aurand, R., M. Faurobert, D. Page, J. F. Maingonnat, B. Brunel, M. Causse and N. Bertin. 2012. Anatomical and biochemical trait network underlying genetic variations in tomato fruit texture. *Euphytica* 187 (1): 99–116. doi:org/10.1007/s10681-012-0760-7.
- Barrett, D. M, E. Garcia and J. E. Wayne. 1998. Textural modification of processing tomatoes. *Food Science and Nutrition* 38 (3): 173–258.
- Beckles, D. M. 2012. Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology* 63: 129–140. doi: 10.1016/j.postharvbio.2011.05.016.
- Beckles, D. M., N. Hong, L. Stamova, and K. Luengwilai. 2012. Biochemical factors contributing to tomato fruit sugar content: A review. *Fruits* 67: 49–64. doi:10.1051/fruits/2011066.

- Benton J. J. 2007. Tomato plant culture. Taylor y Francis group. NY. USA.
- Cantwell, M. 2000. Optimum procedures for ripening tomatoes. In fruit ripening and ethylene management. J.T. Thompson and C. Crisosto (eds.). UC Postharvest Horticulture Series 9:106-116.
- Carrillo-Rodríguez, J. C., J. L. Chávez-Servia, G. Rodríguez-Ortiz, R. Enríquez-del Valle, y Y. Villegas-Aparicio. 2013. Variación estacional de caracteres agromorfológicos en poblaciones nativas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.). Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 6: 1081–1091.
- Casierra-Posada, F., y O. E. Aguilar-Avenidaño. 2008. Calidad en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cosechados en diferentes estados de madurez. Agronomía Colombiana 26 (2): 300–307.
- Causse, M., C. Friguet, C. Coiret, M. Lépiciér, B. Navez, M. Lee, N. Holthuysen, F. Sinesio, E. Moneta, and S. Grandillo. 2010. Consumer preferences for fresh tomato at the European scale: A common segmentation on taste and firmness. Journal of Food Science 75: 531-541. doi: 10.1111/j.1750-3841.2010.01841.x.
- Darnell, R. L., R. Cano- Medrano, K. E. Koch and M. L. Avery. 1994. Differences in sucrose metabolism relative to accumulation of bird- deterrent sucrose levels in fruits of wild and domestic vaccinium species. Physiologia Plantarum 92: 336–42. doi:10.1111/j.1399-3054.1994.tb05345.x.
- Degefa, M., A. Regassa, and K. Mohammed. 2012. Evaluation of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) genotypes for fruit quality and shelf life. The African Journal of Plant Science and Biotechnology 6: 50-56.

- Dominguez, I., M. T. Lafuente, P. Hernandez-Muñoz, and R. Gavara. 2016. Influence of modified atmosphere and ethylene levels on quality attributes of fresh tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Food Chemistry* 209: 211–19. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.04.049.
- Frery, A., T. C. Nesbitt, A. Frery, S. Grandillo, E. Van Der Knaap, B. Cong and J. Liu. 2000. Fw2.2: A quantitative trait locus key to the evolution of tomato fruit size. *Science* 289: 85–88. doi:10.1126/science.289.5476.85.
- Juárez-López, P., R. Castro-Brindis, T. Colinas-León, P. Ramírez-Vallejo, M. Sandoval-Villa, D.W. Reed, L. Cisneros-Zevallos y S. King. 2009. Evaluación de calidad en frutos de siete genotipos nativos de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Var. Cerasiforme). *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 15: 5–9. doi: 10.5154/r.rchsh.2009.15.043
- Kandasamy, P., R. Moitra and S. Mukherjee. 2015. Measurement and modeling of respiration rate of tomato (cultivar Roma) for modified atmosphere storage. *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture* 7: 62–69.
- López-Vidal, O., H. Escalona-Buendía, C. Pelayo-Zaldívar, J. Cruz-Salazar, J. M. Villa-Hernández, F. Rivera-Cabrera, O. Villegas-Torres, I. Alia-Tejacal, L. J. Pérez-Flores, y F. Díaz de León-Sánchez. 2014. Carotenoides, capacidad antioxidante y compuestos volátiles del aroma durante la maduración de jitomate. *Phyton* 83: 185–192
- Panthee, D. R., J. Labate, and L. D. Robertson. 2013. Evaluation of tomato accessions for flavour and flavour-contributing components. *Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization* 11: 106–113. <https://doi.org/doi:10.1017/S1479262112000421>.
- Poel, B. Van de, N. Vandenzavel, C. Smet, N. Toon, I. Bulens, I. Mellidou, and S. Vandonick. 2014. Tissue specific analysis reveals a differential organization and regulation of both

- ethylene biosynthesis and E8 during climacteric ripening of tomato. *Plant Biology* 14: 1471–2229. doi: 10.1186/1471-2229-14-11.
- San Martín-Hernández, C., V. M. Ordaz-Chaparro, P. Sánchez-García, M. T. B. Colinas-León y L. Borges-Gómez. 2012. Calidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) producido en hidroponía con diferentes granulometrías de tezontle. *Agrociencia* 46: 243–254.
- Sánchez, M C, C Valencia, A. Ciruelos, A. Latorre, and C. Gallegos. 2003. Rheological properties of tomato paste: influence of the addition of tomato slurry. *Journal of Food Science* 68: 551–554. doi:10.1111/j.1365-2621.2003.tb05710.x.
- Shammai, A., M. Petreikov, Y. Yeselson, A. Faigenboim, M. Moy- Komemi, S. Cohen, and D. Cohen. 2018. Codes for a sweet transporter keywords: *Solanum* species, fruit sugars, introgression, fructose, sweet transporter. *Plant Journal* 96: 343-357. doi: 10.1111/tpj.14035.
- Shi, J., and M. L. Maguer. 2000. Lycopene in tomatoes: chemical and physical properties affected by food processing. *Critical Reviews in Biotechnology* 20: 293–334. doi10.1080/10408690091189275.
- Tanksley, S. D. 2004. The genetic, developmental, and molecular bases of fruit size in tomato and shape variation. *The Plant Cell* 16: 181–190. <https://doi.org/10.1105/tpc.018119.S182>.
- Vela-Hinojosa, C., H. B. Escalona-Buendía, J. A. Mendoza-Espinoza, F. Díaz de León-Sánchez, R. Lobato-Ortíz, J.E. Rodríguez-Pérez, M. Ramírez-Aguilar, F. Pérez-Díaz, and J. M. Villa-Hernández. 2018. Chemical and sensory analysis of native genotypes and experimental lines of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Fruits* 73: 60–71. doi: /10.17660/th2018/73.1.7.

Weingerl, V., and T. Unuk. 2015. Chemical and fruit skin colour markers for simple quality control of tomato fruits. *Food Science Technology* 7: 76–85. doi: 10.17508/CJFST.2015.7.2.03.

Žnidarčič, D., and T. Požrl. 2006. Comparative study of quality changes in tomato cv. Malike. (*Lycopersicon esculentum* Mill.) whilst stored at different temperatures. *Acta Agriculturae Slovenica* 87: 235–243.

Capítulo III. Determinación de contenidos de licopeno, β -caroteno y α -tocoferol, de la capacidad antioxidante en frutos de variedades nativas de tomate mexicano y expresión génica en la ruta biosintética de carotenoides

3.1 RESUMEN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza con mayor consumo a nivel mundial. El consumo de sus frutos se ha relacionado con efectos benéficos a la salud por sus propiedades antioxidantes y nutricionales, derivadas del contenido de carotenoides, tocoferoles, ácido ascórbico, fenoles, etc. El objetivo de este trabajo fue evaluar la capacidad antioxidante, el contenido de carotenoides como licopeno y β -caroteno, y cuantificar la expresión de genes involucrados en la biosíntesis de carotenoides, en variedades nativas de tomate mexicano en contraste con variedades híbridas comerciales. La capacidad antioxidante se determinó por la prueba DPPH, el contenido de carotenoides se cuantificó mediante HPLC; los análisis de expresión de los genes *E8*, *PDS*, *LYC- ϵ* , *LYC- β 1* y *CYC- β* , se hicieron mediante la técnica de qPCR. Se encontraron diferencias para todas las variables evaluadas ($P \leq 0.05$). La variedad nativa P-257 superó al resto de las variedades evaluadas en contenido de β -caroteno y α -tocoferol ($P \leq 0.05$); en licopeno las variedades nativas P-445, M-430, P-257 y el híbrido experimental O-427×P-445 igualaron a los híbridos comerciales usados como testigos. En capacidad antioxidante todas las variedades nativas fueron superiores a las variedades testigo. En los niveles de expresión génica destacaron las variedades locales C-267, M-430 y P-257, y el híbrido experimental O-427×P-445, para el gen *PDS*. Para los genes β -*LYC* y β -*CYC*, las variedades C-267, P-445, P-256 y M-12 fueron las que registraron mayores niveles de expresión. Para el gen ϵ -*LYC* las variedades locales O-427 y P-257 fueron las que presentaron mayores niveles de expresión.

Palabras clave: Carotenoides, licopeno, β -caroteno, α -tocoferol, antioxidantes, expresión génica.

3.2 ABSTRACT

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is the most consumed vegetable worldwide. Its consumption has been linked to beneficial effects on health, due to its antioxidant and nutritional properties derived from the fruit content of carotenoids, tocopherols, ascorbic acid,

phenols, etc. The objective of this work was to evaluate the antioxidant capacity, the content of carotenoids such as lycopene and β -carotene, and the expression of genes involved in the biosynthesis of carotenoids, in native landraces of Mexican tomatoes as compared to commercial hybrid varieties. The antioxidant capacity was determined by the DPPH test; the content of carotenoids was quantified by HPLC. The expression analyzes of the *E8*, *PDS*, *LYC- ϵ* , *LYC- β 1* and *CYC- β* genes were made using the qPCR technique. Differences among varieties were found for all the traits evaluated ($P \leq 0.05$). The local landrace P-257 overrated all the other landraces and commercial hybrids in content of β -carotene and α -tocopherol; in lycopene the landraces P-445, M-430 and P-257 and the experimental hybrid O-427 \times P-445 were equal to the commercial hybrids ($P \leq 0.05$). In antioxidant capacity all the native landraces were higher than the commercial varieties used as controls in this study. In the levels of gene expression, the landraces C-267, M-430 and P-257, and the experimental hybrid O-427 \times P-445, registered higher levels of expression of the *PDS* gene. For the β -*LYC* and β -*CYC* genes, the landraces C-267, P-445, P-256 and M-12 showed the highest levels of expression. For the ϵ -*LYC* gene, the O-427 and P-257 native landraces presented the highest levels of expression.

Key words: Carotenoids, lycopene, β -carotene, α -tocopherol, antioxidants, gene expression.

3.3 INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los frutos más consumidos a nivel mundial, que además constituye una fuente importante de compuestos con efectos saludables, con potencial de reducir el riesgo de contraer varias enfermedades: tumores del tracto digestivo, procesos inflamatorios, enfermedades cardiovasculares, hipertensión, diabetes, y obesidad. Estas propiedades benéficas se han asociado a la presencia de antioxidantes hidrófilos (principalmente ácido ascórbico y fenoles) y lipófilos, incluidos los carotenoides

(principalmente licopeno y β -caroteno) y la vitamina E (α -tocoferol) (Raiola *et al.*, 2015; Almeida *et al.*, 2011; Shi *et al.*, 1999)

Los carotenoides son un grupo de pigmentos de colores rojo, amarillo y naranja, que están presentes en flores, frutas y verduras. También están presentes en algunos tipos de algas (eucariontes) y en organismos no fotosintéticos como los hongos (Pandurangaiah *et al.*, 2016). Los carotenoides son compuestos esenciales en la dieta humana.

El segundo carotenoide en abundancia en los frutos de tomate es el β -caroteno el cual es el precursor para la biosíntesis de la vitamina A. El efecto positivo de los carotenoides en la dieta humana ha provocado numerosos intentos de desarrollar variedades con mayor acumulación de carotenoides, que no sólo son de importancia agrícola sino también de interés científico en términos de regulación bioquímica, biológica y genética (Liu *et al.*, 2015; Enfissi *et al.*, 2017).

El propósito de este trabajo fue evaluar la capacidad antioxidante, la concentración de los carotenoides principales del fruto de tomate y los niveles de expresión de genes involucrados en la biosíntesis de estos compuestos, en siete variedades nativas de tomate mexicano en contraste con dos híbridos comerciales.

3.4 HIPÓTESIS

- Las variedades nativas de tomate mexicano poseen mayor concentración de compuestos nutraceuticos.
- Las variedades nativas de tomate mexicano tienen mayor expresión de los genes que regulan la biosíntesis de carotenoides.

3.5 MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño experimental

Para la evaluación estadística de las variedades de tomate aquí estudiadas, se empleó un diseño experimental completamente al azar con 10 tratamientos (variedades de tomate). Para la variable actividad antioxidante la unidad experimental consistió en 100 mL de pulpa (repeticiones) proveniente de cuatro frutos en estado maduro. Para las variables de cuantificación de carotenoides (licopeno y β -caroteno) y α -tocoferol, así como para los análisis de expresión génica, la unidad experimental consistió en un (1) fruto de tomate con tres repeticiones.

Variables medidas

Capacidad antioxidante (método DPPH). Este método del DPPH se aplicó como la describieron Kuskoski *et al.* (2005). Este protocolo se basa en la reducción de la absorbancia medida a 515 nm del radical 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH) en presencia de antioxidantes, y se manifiesta como un cambio de color gradual del DPPH (morado) a DPPH-reducido (amarillo).

La curva de calibración se hizo con un espectrofotómetro (Thermo Scientific, NanoDrop 8000, USA) mediante diluciones de Trolox (Merck®) a partir de una solución a 2500 μ M a concentraciones de 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 y 800 μ M en metanol. De cada dilución se tomó una alícuota de 50 μ L y se les añadió 950 μ L de solución metanólica de DPPH (Merck®) a una concentración de 0.2 mM. La mezcla se dejó incubar por 15 min y se leyó la absorbancia a 515 nm.

De la curva patrón se obtuvo la ecuación $y = 2.6^{-1} - 5.51^{-4}x + 2.8^{-7}x^2$ con un valor de $R^2 = 0.99$. Posteriormente se tomaron 950 μ L de la solución metanólica de DPPH 0.2 mM y

se le adicionaron 50 μ L de jugo de tomate de cada una de las muestras, y se leyó la absorbancia a 515 nm. Los resultados se expresaron en actividad equivalente a Trolox (μ M/mL de muestra).

Cuantificación de licopeno, β -caroteno y α -tocoferol. La cuantificación de carotenoides (licopeno β -caroteno) y α -tocoferol se hizo en los laboratorios de Food Science de la Universidad de Leeds en Reino Unido.

Extracción de la muestra. Los solventes utilizados en el procedimiento fueron grado HPLC marca Sigma®. Para la extracción de licopeno, β -caroteno y α -tocoferol la unidad experimental consistió en un tomate (réplica biológica). Se seleccionaron tres frutos de tomate de cada variedad, los cuales se llevaron a liofilización por 72 h. El tejido liofilizado se pulverizó con ayuda de nitrógeno líquido, y se pesó 0.1 g que se trasladó a un tubo de ensayo de vidrio de 15 mL. Posteriormente se añadieron 5 mL de la mezcla de hexano:metanol:acetona [2:1:1] y 1 mL de agua grado HPLC (Sigma®). Se agitó en vórtex por 1 min y se centrifugó a 2500 rpm por 5 min a 4 °C. La capa de hexano se trasladó a otro tubo de ensayo y se hizo una reextracción a la fase orgánica. Se mezclaron los dos sobrenadantes, y se llevaron a evaporación por medio de un concentrador de muestras Techne Sample Concentrator, (modelo FSC400D) mediante gas nitrógeno. El concentrado se resuspendió en 100 μ L de la mezcla de los solventes acetonitrilo:metanol:diclorometano [43:43:14]. El extracto resultante se filtró con un filtro PFTE de disco de membrana (0.22 μ m).

El extracto se inyectó inmediatamente en el equipo de HPLC (Shimadzu System equipado con bomba LC-20AD SP, automuestreador LC 20AC y un detector de diodos SPD-M20A). Se utilizó una columna C18, 250 x 4.6 mm, con 5 μ m de tamaño de partícula (Ascentis® C18

HPLC, modelo 581325-U) y como fase móvil la mezcla de solventes acetonitrilo:metanol:diclorometano [43:43:14]. La velocidad de flujo fue de 1 mL por minuto a temperatura ambiente. El tiempo de análisis fue de 15 min por muestra. Los resultados de licopeno y β -caroteno se leyeron a la longitud de onda de 472 y 450 nm respectivamente, mientras que para la detención de α -tocoferol los resultados de las muestras se leyeron a 290 nm.

Curva de calibración. Para hacer las curvas de calibración se utilizaron compuestos estándar de marca Sigma® de licopeno, β -caroteno y α -tocoferol. Se inyectaron diferentes volúmenes de los compuestos estándar (5, 10, 15, 25, 35, 50 μ L), y por medio de regresión lineal se obtuvieron las ecuaciones para cada uno de los compuestos (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Ecuaciones para determinar la concentración de licopeno, betacaroteno y α -tocoferol en muestras de tomate liofilizado.

Estándar	Ecuación	Valor de R²
Licopeno	$y = 0.0005x + 0.3529$	1
β -caroteno	$y = 0.00004x + 0.1134$	1
α -tocoferol	$y = 0.00005x - 2.2526$	0.9937

El cálculo de la concentración de los diferentes metabolitos se hizo mediante la ecuación 3.1:

$$\text{Concentración del compuesto } (\mu\text{g mg}^{-1}) = (m * x + K) * (FD)/w * 1000 \dots \dots (\text{Ec. 3.1})$$

Donde: m= pendiente de la curva, K= valor de b en la ecuación de regresión lineal, x= área obtenida del cromatograma, FD= factor de dilución, w= peso de la muestra en gramos.

Análisis de expresión génica. Los análisis de expresión génica se hicieron mediante la reacción en cadena de la polimerasa cuantitativa (qPCR, por sus siglas en inglés, quantitative

polimerase chain reaction). Los experimentos se hicieron en laboratorios de Biología Molecular del Departamento de Ciencias Ambientales de la Universidad de Lancaster en Reino Unido. Se midieron los niveles de transcripción de genes involucrados en la ruta de biosíntesis de carotenoides y un gen (E8) asociado al proceso de maduración. La secuencia de los cebadores (“primers”) utilizados se muestran en Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Secuencias de los iniciadores (“primers”) utilizados para el análisis de expresión génica mediante qPCR.

Gen	Número de accesión	Iniciadores qPCR
E8 (asociado a maduración)	Solyc09g089580	F: AGCTGCAAGTTGGAGAGACACG R: CCGCATGGAGTTGGAAATTC
PDS	Solyc03g123760	F: AGCAACGCTTTTTCCTGATG R: TCGGAGTTTTGACAACATGG
ϵ -LYC	Solyc12g008980	F: GCCACAAGAACGAAAACGAC R: CGCGGAAAAATGACCTTATC
LYC- β 1	Solyc10g079480	F: TTGTGGCCCATAGAAAGGAG R: GGCATCGAAAAACCTTCTTG
CYC- β	Solyc06g074240	F: TGGCAAGGGTTCCTTTCTTC R: AGTCATGTTTGAGCCATGTCC

PDS: fitoeno desaturasa. ϵ -*LYC*: licopeno ciclasa- ϵ . β -*LYC*: licopeno ciclasa-beta. β -*CYC*: Cromoplasto licopeno ciclasa-beta. Los iniciadores utilizados para esta tesis fueron de la marca Eurofins Genomics®.

Extracción de ARN. El ARN se aisló mediante extracción fenólica con TRIzol® (Invitrogen), conforme a la metodología descrita por Wang *et al.* (2009), con algunas modificaciones. Se escogieron tres frutos de tomate por variedad, los cuales representaron repeticiones biológicas, y la cosecha de frutos se hizo cuando se encontraban completamente rojos. Los frutos se cortaron en trozos pequeños alrededor de 1 x 1 cm y se liofilizaron por 72 h; posteriormente se mantuvieron en congelación a -21 °C hasta su uso.

Del tejido liofilizado se tomó una muestra, la cual fue molida con un mortero agregando nitrógeno líquido hasta obtener un polvo fino. De cada variedad de tomate se pesó una muestra de 500 µg y se colocó en un tubo Eppendorf de 1.5 mL. Se adicionó 1 mL de TRIzol® y la mezcla se agitó en vórtex. Después de la agitación se le agregó 200 µL de cloroformo, se agitó nuevamente en vórtex y los tubos se reposaron durante 3 min. Después se centrifugó a 10,000 x g, por 15 min a 4 °C. La fase acuosa se recuperó cuidadosamente en un nuevo tubo para centrífuga de 1.5 mL (la fase orgánica fue descartada) y se agregó 500 µL de 2-propanol. Los tubos se incubaron a temperatura ambiente durante 10 min, y después de la incubación se centrifugó a 10,000 x g por 10 min a 4 °C. El sobrenadante fue descartado cuidando de no tirar el “pellet” (ARN precipitado). El pellet se lavó adicionando 1 mL de etanol a 75 % y se centrifugó a 7,600 x g por 5 min a 4 °C; el lavado se hizo dos veces. El pellet se resuspendió en 30 µL de agua Milli-Q.

Una vez aislado el ARN se realizó un tratamiento con DNAasas para eliminar el ADN que pudiera estar presente en la muestra. Para este tratamiento se utilizó 0.5 µL de DNasa I (Qiagen®) por cada gramo de tejido utilizado. Las muestras fueron incubadas a 37 °C por 15 min; posterior a la incubación el ARN se resuspendió en 550 uL de 2-propanol y se centrifugó nuevamente a 10,000 x g por 10 min a 4 °C. El pellet se resuspendió en 30 µL de agua ultra-pura (Milli-Q). La concentración total de RNA se determinó de acuerdo a las mediciones de absorbancia a 260 y 280 nm en un espectrofotómetro NanoDrop provisto con lámpara UV.

Síntesis de cDNA. Con base en los resultados de las lecturas en el NanoDrop, se tomó una muestra de ARN de 1,000 ng. El cálculo para obtener el volumen de ARN se hizo mediante la ecuación 3.2.

Volumen de muestra de ARN= 1,000 / Concentración leída en el Nanodrop* (Ec. 3.2)

* ng de ARN*

A los 1000 ng de ARN se le añadió 1 μL de Oligo DTT (Revertaid first-strand, Thermo Fisher Scientific $\text{\textcircled{R}}$), y se aforó con agua (Milli-Q) a un volumen de 12 μL , después se agitó en vórtex brevemente y se centrifugó por 10 s, y la muestra se incubó en un equipo de PCR (Eppendorf $\text{\textcircled{R}}$ Mastercycler Thermal Cycler PCR) a 65 $^{\circ}\text{C}$ durante 5 min. Posteriormente se preparó una mezcla maestra como se indica en el Cuadro 3.3

Cuadro 3.3. Formulación de la mezcla maestra para síntesis de cDNA.

Reactivos	Cantidades por cada muestra (μL)
5x Buffer	4
RNAse inhibidor	1
10 mM dNTPs	2
RTase	1
Total	8

Se agregaron 8 μL de MM al ARN con lo que se obtuvo un volumen de 20 μL , se agitó y se centrifugó brevemente. Las muestras se incubaron en un equipo de PCR a 42 $^{\circ}\text{C}$ por 60 min, seguido por 72 $^{\circ}\text{C}$ durante 5 min. El cDNA se almacenó a -80 $^{\circ}\text{C}$ hasta su uso.

Análisis de expresión génica por qPCR. La abundancia relativa de ARNm se evaluó mediante PCR cuantitativa (qPCR) con utilizando SYBR Green I (Primerdesign $\text{\textcircled{C}}$) como indicador. Se hicieron tres réplicas por variedad, y los valores medios se usaron para cálculos adicionales. Las abundancias de transcripción normalizadas se calcularon como se describió previamente (Simon, 2003) usando el gen de actina (ATC) de tomate (Solyc04g011500) como gen de referencia. La mezcla de reacción de PCR se hizo conforme se señala en el Cuadro 3.4.

Cuadro 3.4. Componentes para la mezcla de la reacción de qPCR.

Componente	Cantidad por muestra (μL)
SYBR Green	5
Primer 10mM R	1
Primer 10 mM F	1
Agua ultrapura (Milli-Q water)	2
cDNA (200 ng)	1

Total	10 uL
-------	-------

Las condiciones de amplificación para la reacción de qPCR fueron 40 ciclos de desnaturalización a 95 °C durante 10 min; las condiciones de alineación fueron: 60 °C durante 10 s y extensión de 72 °C durante 15 s.

3.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calidad nutracéutica

Concentración de licopeno, β -caroteno y α -tocoferol. Se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.5$) entre las variedades aquí evaluadas para los contenidos de licopeno, betacaroteno y α -tocoferol (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.5. Comparación de medias para la concentración de licopeno, β -caroteno y α -tocoferol y capacidad antioxidante, en siete variedades de tomate nativo mexicano, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales.

Variedad	Licopeno ($\mu\text{g/g}$)	β -caroteno ($\mu\text{g/g}$)	α -tocoferol ($\mu\text{g/g}$)	Actividad antioxidante ($\mu\text{M Trolox/mL}$)
DRD 8551	154.2 ab \pm 23.0	21.2 cde \pm 3.5	3.7 cde \pm 0.5	529.6 e \pm 12.0
El Cid	179.0 a \pm 19.3	28.9 bcd \pm 4.5	5.2 bc \pm 0.6	564.9 d \pm 4.9
C-267	79.2 c \pm 18.3	14.4 de \pm 4.2	3.8 cde \pm 0.4	632.9 b \pm 10.1
O-427	102.0 bc \pm 35.4	13.8 e \pm 8.9	3.3 de \pm 0.9	692.1 a \pm 9.2
P-445	182.3 a \pm 33.3	33.7 bc \pm 12.6	5.8 ab \pm 0.3	690.1 a \pm 9.3
M-430	201.2 a \pm 66.6	36.4 ab \pm 3.3	4.9 bcd \pm 1.8	611.5 bc \pm 7.2
M-12	60.3 c \pm 37.1	13.0 e \pm 10.5	4.0 bcde \pm 1.0	704.8 a \pm 15.9
P-256	54.2 c \pm 10.6	16.3 de \pm 4.5	2.5 e \pm 0.5	700.4 a \pm 12.5
P-257	164.8 ab \pm 46.1	49.5 a \pm 11.9	7.1 a \pm 1.0	694.2 a \pm 12.3
O-427 \times P-445	154.3 ab \pm 18.4	34.1 bc \pm 4.0	5.1 bc \pm 1.1	600.5 c \pm 9.6
DSH	66.1	14.7	1.8	31.1

DSH: diferencia significativa honesta. Medias con la misma letra en las columnas no son significativamente diferentes (Tukey, 0.05)

En contenido de licopeno las variedades P-445, M430, P-257 y el híbrido experimental O-427×P-445 fueron iguales que los híbridos comerciales. La concentración de licopeno para las variedades nativas en este experimento fluctuó entre 54.2 y 201.2 $\mu\text{g/g}$ (en base seca), rango que se encuentra por arriba del reportado por Shi *et al.* (2000) para la variedad comercial Heinz 9478, la cual fluctuó de 72.6 a 75.5 $\mu\text{g/g}$., y seis de las variedades nativas evaluadas fueron numéricamente superiores a esta variedad. En variedades nativas de tomate mexicano y líneas experimentales de tomate, Vela-Hinojosa *et al.* (2018) reportaron contenidos de licopeno en el rango de 4.5 a 0.5 mg/100 g de peso fresco, rango que es inferior al registrado en las variedades nativas evaluadas en el presente experimento.

El β -caroteno es la principal fuente de vitamina A en la dieta humana, necesaria para el desarrollo normal, el crecimiento y la vista (Baranska *et al.*, 2006; Flores *et al.*, 2017). En contenido de β -caroteno la variedad nativa P-257 fue la que mayor concentración registró y la única variedad nativa que superó a los híbridos comerciales; las variedades nativas M-430, P-445, y el híbrido experimental O-427×P-445 fueron estadísticamente iguales al híbrido comercial El Cid. Flores *et al.* (2017) reportaron concentraciones de β -caroteno de 1 a 11 $\mu\text{g/g}$ en genotipos tradicionales de tomate, mientras que El-Qudah (2009) reportó un rango entre 0.79 y 14.5 $\mu\text{g/g}$, y Baranska *et al.* (2006) encontraron contenidos de 7.8 a 23 $\mu\text{g/g}$. En cuanto al contenido de β -caroteno en las variedades nativas evaluadas en el presente experimento fluctuó entre 13 y 49.5 $\mu\text{g/g}$, por lo que aquí hay variedades con concentraciones de hasta tres veces las reportadas por otros autores.

En contenido de α -tocoferol las variedades nativas P-257 y P-445 fueron estadísticamente superiores a los híbridos comerciales. El rango en la concentración de este compuesto para las variedades nativas fluctuó de 2.5 a 7.1 $\mu\text{g/g}$. En contraste, Zanfini *et al.* (2010) reportaron

contenidos de α -tocoferol en frutos de tomate de 6.2 a 8.2 $\mu\text{g/g}$, rango superior al encontrado en este experimento. Sin embargo, Raiola *et al.* (2015) postularon que la concentración de tocoferoles puede variar por una serie de diferentes variables, entre ellas el tejido utilizado para el análisis, las condiciones de estrés del cultivo, el estado fisiológico de la planta, el nivel de salinidad, de intensidad de luz y de temperatura, etc.

Actividad antioxidante. La actividad antioxidante en frutos de las variedades nativas fluctuó de 600.5 a 704.8 $\mu\text{M Trolox/mL}$, que son valores superiores a los de los híbridos comerciales aquí evaluados. Las variedades con mayor capacidad antioxidante fueron las nativas O-427, P-256 y P-257. Según Bhandari *et al.* (2016), en comparación con otros cultivos hortícolas los tomates tienen altas propiedades antioxidantes porque poseen cantidades considerables de antioxidantes como carotenoides, compuestos fenólicos, flavonoides y ácido ascórbico.

Expresión de genes involucrados en la biosíntesis de carotenoides

La composición y el contenido de los carotenoides están determinados parcialmente por las fluctuaciones genéticas (Liu *et al.*, 2015). Los carotenoides son isoprenoides sintetizados a partir de precursores metabólicos suministrados por la vía plastidial, metileritritol 3 – fosfato (MEP) (Figura 3.1). Durante la maduración del tomate, las transcripciones de los genes que codifican desoxixilulosa 5-fosfato sintasa (DXS), geranilgeralilo pirofosfato sintasa (GGPPS), fitoeno sintasa (PSY), fitoeno desaturasa (PDS), ζ -caroteno desaturasa (ZDS) y caroteno isomerasa (CrtISO), están altamente regulados y contribuyen a la formación de licopeno. La ciclación del licopeno es un punto de ramificación central en la ruta biosintética del carotenoide (Figura 3.1). Una ruta conduce a la formación de β -caroteno, zeaxantina,

violaxantina y neoxantina, y otra conduce a la formación de α -caroteno y luteína (Liu *et al.*, 2015; D'Andrea *et al.*, 2018; Botella-Pavía *et al.*, 2004).

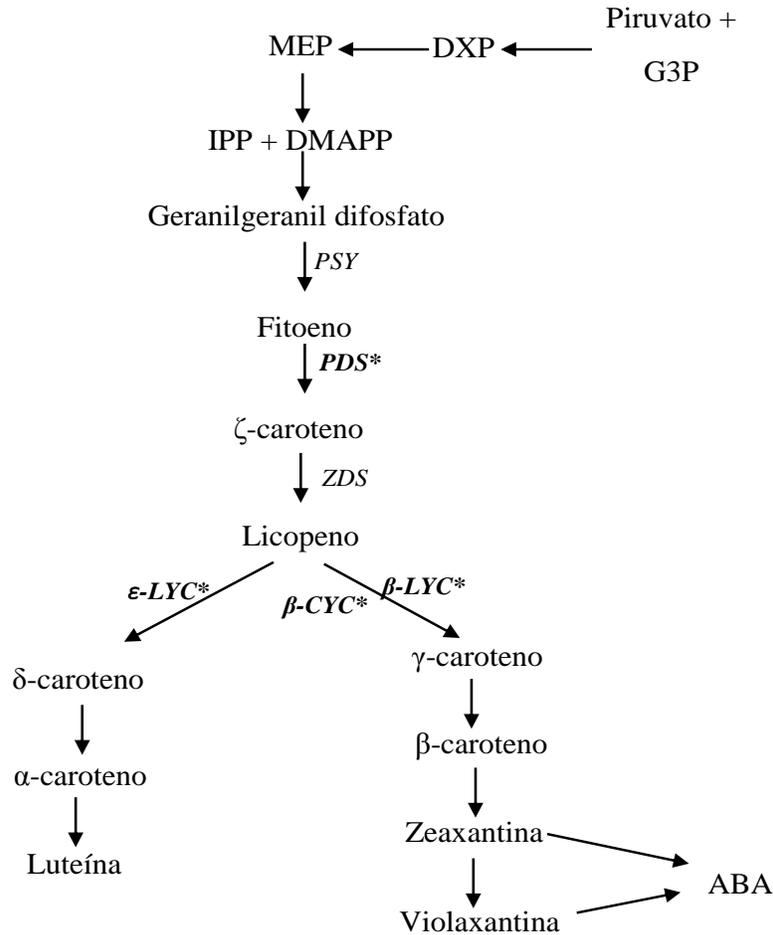


Figura 3.1. Ruta de biosíntesis de carotenoides, G3P: gliceraldehído 3-fostato, DXP: desoxixilulosa 5-fostato, MEP: Metileritritol 3 – fostato, IPP: isopentenil difosfato, DMAPP: dimetilalil difosfato. (D'Andrea *et al.*, 2018; Rosati *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2015).

Los resultados de la expresión genética del gen *E8* se muestran en la Figura 3.2, donde el testigo comercial El Cid y la variedad nativa C-267 presentaron una mayor expresión de este gen asociado al proceso de maduración. La expresión de *E8* es altamente inducida por el

etileno en el fruto y por señales de la maduración (Kim *et al.*, 2015). Considerando que una mayor expresión de este gen está asociado a un estado de madurez naranja del fruto (D'Andrea *et al.*, 2018), es pertinente considerar que los frutos aquí evaluados se cosecharon cuando se encontraban completamente rojos, de modo que la expresión del gen *E8* en algunas variedades sugiere que sus frutos se encontraban en la transición de naranja a rojo, mientras que en variedades como el híbrido experimental O-427×P-445 los frutos se encontraban más rojos o finalizando el proceso de maduración.

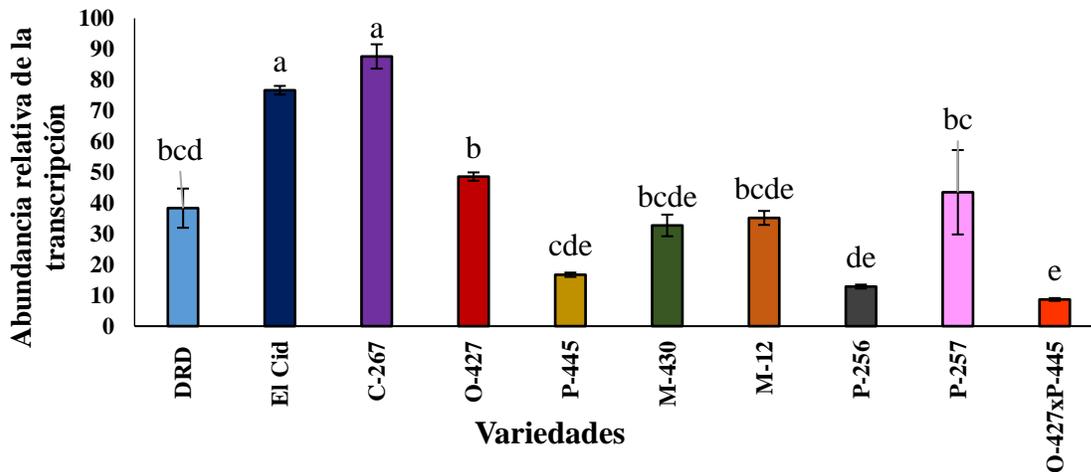


Figura 3.2. Niveles de transcripción para el gen *E8* en frutos de siete variedades nativas de tomate mexicano, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales. Letras iguales no tienen diferencias significativas entre variedades (Tukey, 0.05).

El gen de fitoeno desaturasa (*PDS*) codifica para la formación de la enzima fitoeno desaturasa la cual cataliza la reacción para convertir al fitoeno en ζ -caroteno, y este compuesto es transformado a licopeno por medio de las enzimas ζ -caroteno desaturasa (*ZDS*) y la enzima ζ -caroteno isomerasa (*ZISO*) (Enfissi *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2015). Los niveles de expresión del gen *PDS* fueron diferentes entre las variedades estudiadas (Figura 3.3), de las cuales la nativa M-430 fue la que mayor expresión registró para este gen, seguida de las variedades locales C-267 y P-257 y del híbrido experimental O-427×P-445; estas tres variedades fueron

iguales a los híbridos testigo en los niveles de expresión. Es de hacer notar que dos variedades nativas M-430 y P-257 y el híbrido experimental formado entre dos poblaciones nativas O-427×P-445 registraron las concentraciones más altas para licopeno, y todas ellas estadísticamente superiores a los híbridos comerciales.

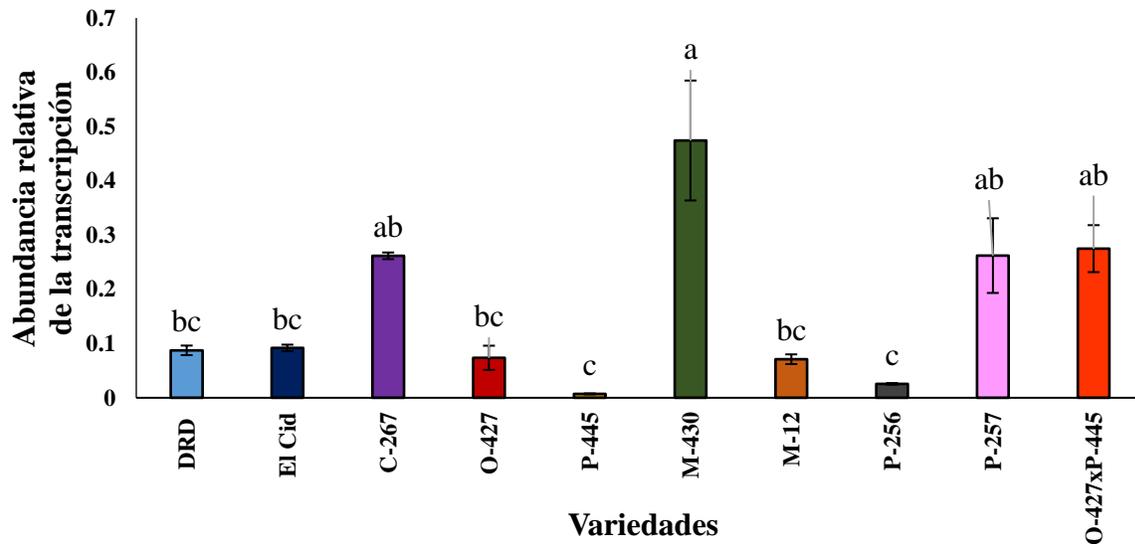


Figura 3.3. Niveles de transcripción para el gen *PDS* en frutos de siete variedades nativas de tomate mexicano, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales. Letras iguales no tienen diferencias significativas entre variedades (Tukey, 0.05).

El licopeno en los frutos de tomate puede ciclarse por acción de las enzimas ϵ -ciclasas y β -ciclasas (ϵ -LYC, β -LYC) para dar origen a los compuestos α -caroteno y β -caroteno respectivamente. La acción enzimática está regulada por la expresión de los genes ϵ -LYC, β -LYC y β -CYC (Pandurangaiah *et al.*, 2016; Llorente *et al.*, 2016). En la Figura 3.4, se muestran los resultados obtenidos para la expresión del gen ϵ -LYC, en donde se encontraron diferencias ($P \leq 0.05$) entre las variedades evaluadas. Los resultados de ϵ -LYC se clasificaron en tres grupos de acuerdo con su nivel de expresión. El Grupo 1 varió de 0.8 a 0.1, el Grupo 2 de 0.4 a 0.5, y el Grupo 3 de 0.002 a 0.025. Las variedades pertenecientes al G1 (las nativas O-427 y P-257) registraron mayor abundancia de este gen, lo que indica que el licopeno pudo seguir

la ruta hacia la formación de luteína el cual según Yuan *et al.* (2015) es un compuesto de importancia nutracéutica con propiedades antioxidantes.

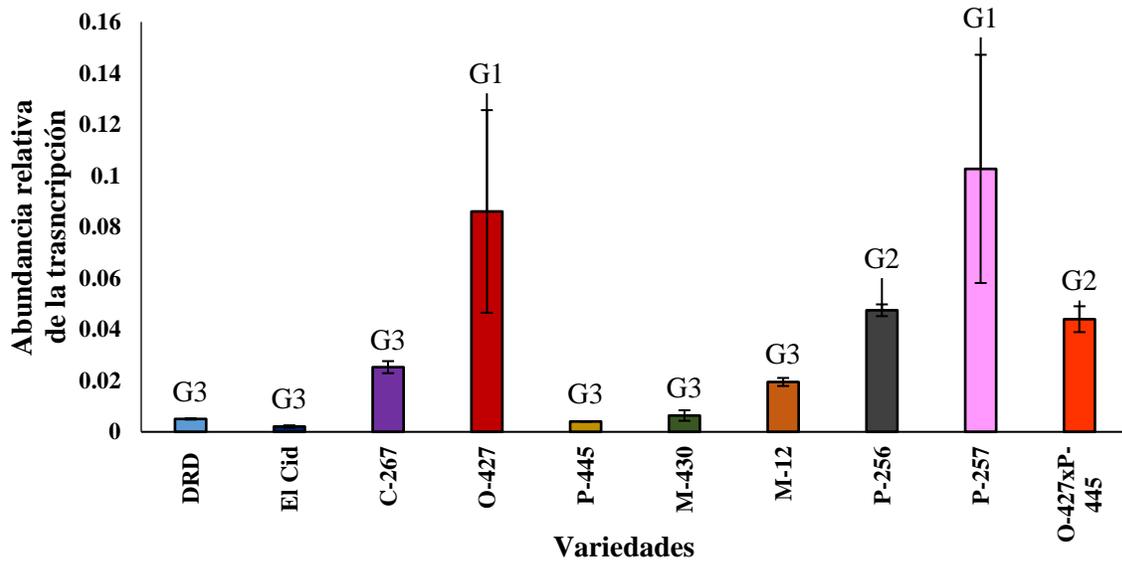


Figura 3.4. Niveles de transcripción para el gen ϵ -LYC en frutos siete variedades nativas de tomate mexicano, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales. G1: grupo 1 de 0.08 a 0.1. G2: grupo 2 de 0.04 a 0.05 G3: grupo 3 de 0.002 a 0.025. (LDS-Fisher, 0.05).

Genes de ciclasas. El gen de licopeno β -ciclase cataliza una reacción de dos etapas que conduce a la formación de β -caroteno. Hay dos tipos de licopeno β -ciclase; la licopeno β -ciclase específica para el cromoplasto (β -CYC), y la licopeno β -ciclase específica para el cloroplasto (β -LCY) (Pandurangaiah *et al.*, 2016). Los resultados de la expresión del gen β -LCY (Figura 3.5), muestran diferentes niveles de expresión entre los materiales estudiados, donde las variedades nativas P-256, M-12 y P-257 fueron las que registraron mayor nivel de expresión para este gen en comparación a las demás variedades estudiadas. En cuanto a la expresión del gen β -CYC (Figura 3.6), las variedades locales C-267, P-445 y M-12 fueron las que registraron mayor abundancia.

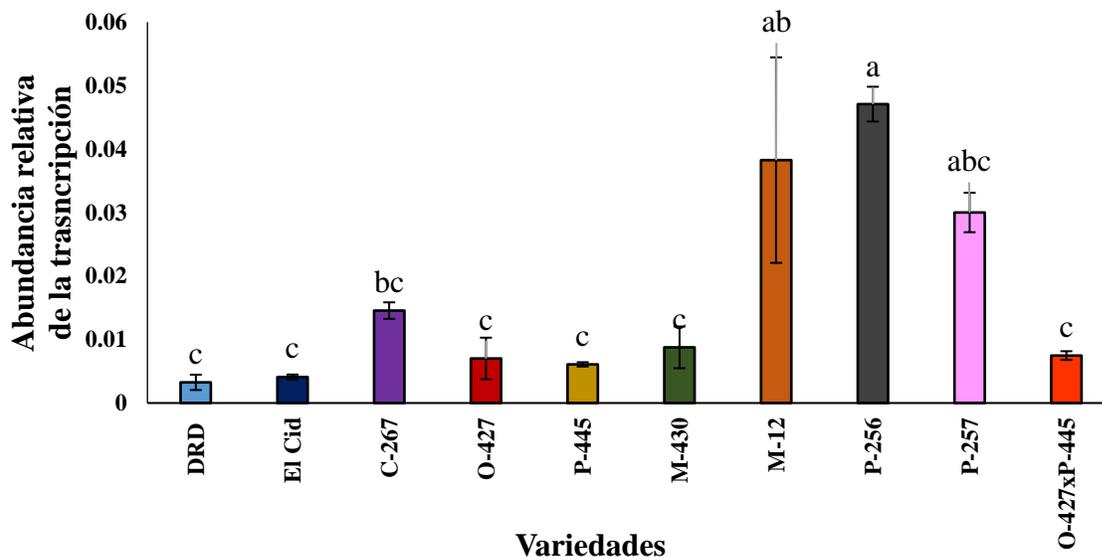


Figura 3.5. Niveles de transcripción para el gen β -ciclasa de licopeno específica para el cloroplasto (β -*LCY*) en frutos de siete variedades nativas de tomate mexicano, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales. Letras iguales no tienen diferencias significativas entre variedades (Tukey, 0.05).

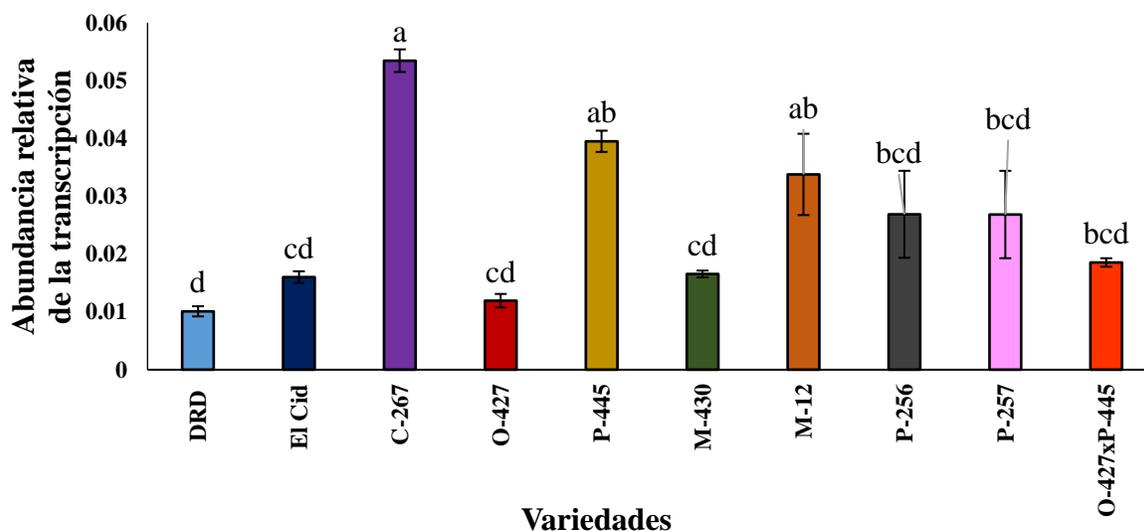


Figura 3.6. Niveles de transcripción para el gen β -ciclasa de licopeno específica para el cromoplasto (β -*CYC*) en frutos de siete variedades nativas de tomate mexicano, un híbrido experimental y dos híbridos comerciales. Letras iguales no tienen diferencias significativas entre variedades (Tukey, 0.05).

Yuan *et al.* (2015) mencionan que el aumento de la transcripción de β -LYC conduce a la conversión de licopeno en β -caroteno, por lo que las variedades que sobresalen en los niveles de expresión de este gen tienen potencial para sintetizar más β -caroteno. Debe considerarse que los niveles de expresión de los genes β -LYC y β -CYC en los materiales estudiados pudieron verse influenciados por el estado de madurez de los frutos evaluados, que en todos los casos se procuró que fuera el estado de madurez de consumo. D'Andrea *et al.* (2018) mostraron que hay mayores niveles de transcripción para los genes asociados a la biosíntesis de carotenoides, cuando los frutos estaban en un estado de madurez naranja (47 d después de anthesis).

Además de la regulación genética y hormonal en la acumulación de carotenoides en los frutos de tomate, existen otros factores (como la intensidad de luz), que pueden tener influencia en la maduración de los frutos (Llorente *et al.*, 2016). Por su parte, Toledo-Ortiz *et al.* (2010) mencionan que los fitocromos (fotorreceptores) localizados en el fruto controlan diversos aspectos de la maduración del tomate, incluida la acumulación de carotenoides. Esto implica que las diferencias observadas, tanto en los niveles de expresión génica como en los de acumulación de carotenoides en los frutos de las variedades evaluadas, se pudieron ver afectadas por el factor ambiente durante la formación del fruto.

3.7 CONCLUSIONES

En este estudio se demuestra que hay variedades nativas con amplio potencial para generar variedades mejoradas con mayores propiedades nutraceuticas, debido a que algunas de ellas fueron superiores a los híbridos comerciales en contenidos de β -caroteno y α -tocoferol, así como en actividad antioxidante. Por ejemplo, la variedad nativa P-257 fue superior a los dos

híbridos testigo en contenidos de β -caroteno y α -tocoferol, mientras que en capacidad antioxidante todas las variedades nativas fueron superiores a los híbridos comerciales.

En expresión génica destacan algunas variedades nativas, porque presentaron el mayor nivel de expresión en los genes evaluados que forman parte del proceso de biosíntesis en carotenoides. Las variedades nativas C-267, M-430 y P-257, y el híbrido experimental O-427×P-445, mostraron mayores niveles de expresión en el gen de *PDS*, lo que indica que estas variedades registran mayor actividad de la ruta de formación de carotenoides, y se pueden seleccionar para hacer mejoramiento genético con el fin de incrementar el contenido de licopeno de los frutos.

Además, las variedades nativas C-267, P-445, P-256 y M-12 presentaron mayores niveles de expresión de los genes β -*LYC* y β -*CYC*, por lo que estas variedades nativas pueden ser fuente de genes para incrementar el contenido de β -caroteno en los frutos de tomate, lo cual es de interés debido a las deficiencias en la población mundial de Vitamina A.

Debido a las diferencias en el origen de las variedades evaluadas es recomendable hacer este tipo de evaluaciones en diferentes ambientes y estados de madurez de los frutos, para observar y cuantificar en qué magnitud la expresión génica y la acumulación de carotenoides varían en función de estos factores.

3.8 LITERATURA CITADA

- Almeida, J., L. Quadrana, R. Asís, N. Setta, F. Godoy, L. Bermúdez and A. R Fernie. 2011. Genetic dissection of vitamin E biosynthesis in tomato. *Journal of Experimental Botany* 10: 1–18. doi: 10.1093/jxb/err055.
- Baranska, M., W. Schütze, and H. Schulz. 2006. Determination of lycopene and β -carotene content in tomato fruits and related products: comparison of Ft-Raman, ATR-IR, and NIR spectroscopy. *Analytical Chemistry* 78: 8456–8461 doi: 10.1021/ac061220j.
- Bhandari, S. R., M.-C. Cho, and J. G. Lee. 2016. Genotypic variation in carotenoid, ascorbic acid, total phenolic, and flavonoid contents, and antioxidant activity in selected tomato breeding lines. *Horticultural Environmental Biotechnology* 57: 440–452. doi: 10.1007/s13580-016-0144-3.
- D’Andrea, L., M. Simon-Moya, B. Llorente, E. Llamas, M. Marro, P. Loza-Alvarez, L. Li, and M. Rodriguez-Concepcion. 2018. Interference with Clp protease impairs carotenoid accumulation during tomato fruit ripening. *Journal of Experimental Botany* 69: 1557–1568. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx491>.
- El-Qudah, J. M. 2009. Identification and quantification of major carotenoids in some vegetables. *American Journal of Applied Sciences* 6: 492–497.
- Enfissi, E. M., M. Nogueira, P. M. Bramley, and P. D. Fraser. 2017. The regulation of carotenoid formation in tomato fruit. *Plant Journal* 89: 774–788. doi:10.1111/tpj.13428.
- Flores, P., E. Sánchez, J. Fenoll, and P. Hellín. 2017. Genotypic variability of carotenoids in traditional tomato cultivars. *Food Research International* 100: 510–516. doi: 10.1016/j.foodres.2016.07.014.

- Kim, J.-Y., J.-S. Lee, T.-R. Kwon, S.-I. Lee, J.-A. Kim, G.-M. Lee, S.-C. Park, and M.-J. Jeong. 2015. Postharvest biology and technology sound waves delay tomato fruit ripening by negatively regulating ethylene biosynthesis and signaling genes. *Postharvest Biology and Technology* 110: 43–50. doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.07.015.
- Kuskoski, E. M., A. G. Asuero, A. M. Troncoso, J. Mancini-Filho, y R. Fett. 2005. Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 25: 726–732. doi: 10.1590/S0101-20612005000400016.
- Liu, L., Z. Shao, M. Zhang, and Q. Wang. 2015. Regulation of carotenoid metabolism in tomato. *Molecular Plant* 8: 28–39. doi: 10.1016/j.molp.2014.11.006.
- Llorente, B., L. D Andrea, M. A. Ruiz-Sola, E. Botterweg, P. Pulido, J. Andilla, P. Loza-Álvarez, and M. Rodríguez-Concepción. 2016. Tomato fruit carotenoid biosynthesis is adjusted to actual ripening progression by a light-dependent mechanism. *The Plant Journal* 85:107–119. doi: 10.1111/tpj.13094.
- Pandurangaiah, S., K. Ravishankar, K. Shivashankar, A. Sadashiva, K. Pillakencheppa, and S. Kumar. 2016. Differential expression of carotenoid biosynthetic pathway genes in two contrasting tomato genotypes for lycopene content. *Journal of Biosciences* 41: 257–264. doi: /10.1007/s12038-016-9602-4.
- Raiola, A., G. C. Tenore, A. Barone, L. Frusciante, and M. M. Rigano. 2015. Vitamin E content and composition in tomato fruits: beneficial roles and bio-fortification. *International Journal of Molecular Sciences* 16: 29250–29264. doi: 10.3390/ijms161226163.

- Shi, J., M. L. Maguer, Y. Kakuda, A. Liptay, and F. Niekamp. 1999. Degradation, lycopene dehydration, and isomerization in tomato. *Food Research International* 32: 15–21.
- Shi, J., M. L. Maguer, J. Shi, and M. L. Maguer. 2000. Lycopene in tomatoes: chemical and physical properties affected by food processing. *Critical Reviews in Biotechnology* 20: 293–334. <https://doi.org/10.1080/10408690091189275>.
- Simon, P. 2003. Q-Gene: processing quantitative real-time RT-PCR data. *Bioinformatics* 19: 1439–1440. doi: 10.1093/bioinformatics/btg157.
- Vela-Hinojosa, C., H. B. Escalona-Buendía, J. A. Mendoza-Espinoza, F. Díaz de León-Sánchez, R. Lobato-Ortíz, J.E. Rodríguez-Pérez, M. Ramírez-Aguilar, F. Pérez-Díaz, and J. M. Villa-Hernández 2018. Chemical and sensory analysis of native genotypes and experimental lines of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Fruits* 73: 60–71. doi: 10.17660/th2018/73.1.7.
- Yuan, H., J. Zhang, D. Nageswaran, and L. Li. 2015. Carotenoid metabolism and regulation. *Horticultural Research* 2: 15036. doi: 10.1038/hortres.2015.36.
- Zanfani, A., G. Corbini, C. La Rosa, and E. Dreassi. 2010. Antioxidant activity of tomato lipophilic extracts and interactions between carotenoids and α -tocopherol in synthetic mixtures. *Food Science and Technology* 43: 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.06.011>

CONCLUSIONES GENERALES

Sin haber sido sometidas al mejoramiento genético formal, las variedades nativas P-256, P-257 y P-445 fueron iguales en rendimiento a las variedades híbridas comerciales DRD y El Cid. En componentes del rendimiento, como números de flores y de frutos, las variedades C-267, O-427 y M-430 fueron superiores a los híbridos testigo, lo que evidencia su potencial para ser usadas en producción o incluidas en programas de mejoramiento genético destinadas a elevar el rendimiento de fruto.

En las características organolépticas todas las variedades nativas, con excepción de P-256, registraron un balance deseable entre el contenido de sólidos solubles totales y porcentaje de ácido cítrico (acidez), que implica un alto índice de madurez ($IM > 12.5$) como se recomienda en la literatura pertinente, lo cual hace atractivos a sus frutos para el consumo en fresco.

También se identificaron variedades nativas con concentraciones de compuestos nutraceuticos superiores a las de los híbridos comerciales. En contenido de licopeno destacó la variedad M-430, y en cuanto β -caroteno y α -tocoferol la variedad de mayor concentración de estos compuestos fue la población nativa P-257.

Los análisis de expresión génica revelaron que hay variedades nativas que poseen mayores niveles de expresión de genes involucrados en la ruta biosintética de carotenoides. Entre los altos niveles de expresión para el gen *PDS*, la variedad M-430 superó a las demás, mientras que las variedades O-427 y P-257 destacaron en la expresión de los genes ϵ -*LYC*. Para el gen β -*LYC* destacaron las variedades nativas P-256, M-12 y P-257, y en el gen β -*CYC* sobresalió la variedad nativa C-267 por sus mayores niveles expresión. Las variedades locales P-445 y P-257, además sobresalir en las pruebas de niveles de expresión de genes y de acumulación

de carotenoides, también presentaron altos rendimiento de fruto (3.93 y 3.94 kg/planta, respectivamente), y en calidad presentaron características sensoriales deseables de alto nivel como el índice de madurez que fue mayor a 12.5 para ambas.

Se puede concluir que este estudio provee información relevante acerca de variedades nativas de tomate mexicano sobresalientes, lo que permite resaltar la importancia de la conservación de estos recursos genéticos, así como la conveniencia de ampliar su uso tanto en la agricultura tradicional como en programas de mejoramiento genético que conduzcan a generar híbridos comerciales mexicanos con mejores características nutraceuticas.

Por los resultados registrados, en el híbrido experimental O-427×P-445 (generado mediante la cruce entre dos poblaciones nativas), se muestra que esta técnica de mejoramiento genético que aprovecha la heterosis (vigor híbrido) no sólo es adecuada para aumentar el rendimiento de fruto sino también mejorar características de calidad sensorial deseables como en alto índice de madurez superior a 12.5 y en elevar la firmeza del fruto al nivel de híbridos comerciales en uso como El Cid. Asimismo, en calidad nutraceutica el híbrido experimental superó a los dos híbridos comerciales en actividad antioxidante (Aox) y en los niveles de expresión del gen ϵ -LYC; además, fue superior al híbrido DRD en el nivel de expresión del gen β -CYC.

Si bien es necesario hacer mejoramiento formal de las variedades nativas sobresalientes, tanto para aumentar el rendimiento como elevar la firmeza y vida postcosecha, los resultados demuestran que hay variedades nativas que pueden ser directamente utilizadas para explotación comercial, y que pueden ser mejoradas aún más para lograr mayores características de interés agronómico y nutricional mediante la obtención de variedades híbridas mexicanas de tomate.