ANÁLISIS DIALÉLICO DE LÍNEAS DE TOMATES DE HÁBITO DE CRECIMIENTO INDETERMINADO PARA RENDIMIENTO Y CALIDAD DE FRUTO

DIALLELIC ANALYSIS OF INDETERMINATE GROWTH HABIT TOMATO LINES FOR YIELD AND FRUIT QUALITY

Sandro Balbuena-Mascada[1], Ricardo Lobato-Ortiz[1]*, J. Jesús García-Zavala[1], Eduardo Rodríguez-Guzmán[2] y Serafín Cruz-Izquierdo[1]

[1]Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Posgrado de Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. [2]Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Zapopan, Jalisco, México.

**Autor de correspondencia* (rlobato@colpos.mx)

RESUMEN

En México, el cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es de gran importancia socioeconómica; sin embargo, el mejoramiento genético de esta especie en este país lo efectúan, principalmente, empresas privadas. El objetivo del presente estudio fue analizar la aptitud combinatorias general (ACG) y específica (ACE), y la heterosis de cruzas dialélicas mediante el Método II de Griffing Modelo I, de seis líneas S_5 de tomate con diferente forma de fruto y hábito de crecimiento indeterminado, y comparar su comportamiento con un híbrido comercial (El Cid®) en condiciones de invernadero e hidroponía. Se evaluaron 22 genotipos en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones de 10 plantas cada una, en Montecillo, Estado de México en 2022. Se registró información fenológica, características físicas y de calidad de fruto, así como el número y peso total de frutos (PTF) y racimos por planta. Se realizó análisis de varianza y comparación de medias (Tukey, $P \leq 0.05$). El análisis dialélico se realizó mediante el programa DIALLEL-SAS05; se estimaron los efectos de ACG, ACE, la heterosis media y heterobeltiosis. Se encontraron diferencias estadísticas entre genotipos y su partición en ACG y ACE para todas las variables. Para PTF destacaron las líneas 22021 y 22015 en ACG (222.6** y 231.6**), y los híbridos 22018, 22017 y 22016 en ACE (379-735**). Las líneas 22021 y 22010 mostraron la mayor divergencia genética (ACE en PTF de -779.6** y -307.8) y sus híbridos 22014, 22008, 22018, 22017, 22019 y 22016 expresaron heterobeltiosis de 1.5 a 19.4 % en PTF. Los genotipos 22017, 22014, 22018, 22015 y 22020 produjeron más de 4500 g por planta (200.0 a 206.7 t ha^{-1}) y no fueron diferentes a El Cid® en PTF. Las líneas 22021, 22015 y 22010 podrían aprovecharse en programas de mejoramiento genético.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., aptitud combinatoria, heterobeltiosis, Método II de Griffing.

SUMMARY

In Mexico, the cultivation of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is of great socio-economic importance; however, the breeding of this species in the country is carried out mainly by private companies. This study aimed to analyze the general (GCA) and specific (SCA) combining ability, and heterosis of diallelic crosses by the Griffing's Method II Model I, of six S_5 tomato lines with different fruit shape and indeterminate growth habit, and compare their performance with a commercial hybrid (El Cid®) under greenhouse and hydroponic conditions. Twenty-two genotypes were evaluated in a randomized complete block design with three replicates of 10 plants each, in Montecillo, Mexico in 2022. Phenological information, physical characteristics and fruit quality traits were recorded, as well as the number, total weight of fruits (TWF) and bunches per plant. Analysis of variance and comparison of means (Tukey, $P \leq 0.05$) were performed. Diallelic analysis was carried out using the DIALLEL-SAS05 program; the effects of GCA, SCA, mean heterosis and heterobeltiosis were estimated. Statistical differences were found between genotypes and their partition into GCA and SCA for all variables. For TWF, lines 22021 and 22015 stood out in GCA (222.6** and 231.6**), while hybrids 22018, 22017 and 22016 did so in SCA (379-735**). Lines 22021 and 22010 showed the greatest genetic divergence (SCA in TWF of -779.6** and -307.8) and their hybrids 22014, 22008, 22018, 22017, 22019 and 22016 expressed heterobeltiosis of 1.5 to 19.4% in TWF. Genotypes 22017, 22014, 22018, 22015 and 22020 produced more than 4500 g per plant (200.0 to 206.7 t ha^{-1}) and were not different from El Cid® in TWF. Lines 22021, 22015 and 22010 could be used in breeding programs.

Index words: *Solanum lycopersicum* L., combining ability, Griffing method II, heterobeltiosis.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es de gran importancia socioeconómica en México. En 2022 la producción mundial de esta hortaliza fue de 254.4×10^6 t; México destacó como el octavo país productor y aportó el 1.65 % (4.21×10^6 t) (FAO, 2024), de las que 1.77×10^6 t del tipo saladette provinieron de agricultura protegida (SIAP, 2023). A pesar de su relevancia, sólo 22 variedades de tomate se han inscrito en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales, y 20 de ellas pertenecen a empresas privadas (SNICS, 2022).

El mejoramiento genético de esta especie lo realizan, principalmente, empresas transnacionales para la generación de semillas híbridas, las cuales superan en calidad de fruto y rendimiento a las líneas puras (Reddy *et al*., 2020). Ante esto, es importante crear programas de mejoramiento genético nacionales y públicos, que amplíen la base genética de este cultivo para satisfacer las necesidades de los productores y consumidores (Balbuena-Mascada *et al*., 2023), además de ser estables en rendimientos (Reddy *et al*., 2020). En este sentido, para la formación de nuevas variedades es crucial

Recibido: 13 de julio de 2024
Aceptado: 18 de diciembre de 2024

DOI: https://doi.org/10.35196/rfm.2025.1.33

evaluar y seleccionar los progenitores con base en su comportamiento *per se* y en combinaciones híbridas.

Con los análisis dialélicos se ha logrado identificar líneas e híbridos de tomate útiles para aumentar los rendimientos y sus componentes, número de frutos, flores y racimos por planta (de Souza *et al*., 2012; Rajkumar *et al*., 2018), además de rasgos de calidad de fruto como la firmeza, longitud, diámetro, peso, forma, contenido de sólidos solubles, ácido ascórbico, licopeno, acidez, materia seca, vida de anaquel, grosor de pericarpio (Bdr *et al*., 2020; Graça *et al*., 2015; Kumar *et al*., 2018; Reddy *et al*., 2020), para cambiar atributos como altura de planta, diámetro de tallo, precocidad a floración y a maduración (Bdr *et al*., 2020) y en la generación de híbridos de cruza doble (de Matos *et al*., 2021).

En México, los análisis dialélicos en tomate permitieron estimar los tipos de acción génica y heterosis que influyen en rendimiento, precocidad y calidad de frutos en cruzas de híbridos con hábito de crecimiento indeterminado (HCI) tipo saladette (Mendoza-de Jesús *et al*., 2010), en la progenie de germoplasma nativo con probadores de fruto tipo saladette (Martínez-Vázquez *et al*., 2017), y de líneas con diferente tipo de crecimiento en campo abierto (Gayosso-Barragán *et al*., 2019); sin embargo, son necesarios estudios de dialélicos en tomates para la producción en invernaderos e hidroponía, en los que además del rendimiento y sus componentes, se analicen la precocidad y calidad de frutos.

Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar la ACG y ACE de seis líneas élite de tomate con diferente forma de fruto y crecimiento indeterminado, y sus cruzas directas, en algunas características agronómicas y de calidad de fruto para seleccionar genotipos sobresalientes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético

El material genético evaluado consistió en 22 genotipos de hábito de crecimiento indeterminado: seis líneas progenitoras y sus 15 híbridos (cruzas directas), más el híbrido comercial El Cid® (Semillas Harris Moran Mexicana S.A. de C.V) como testigo. Las líneas se derivaron de tomates nativos e híbridos comerciales a los que se les aplicó mejoramiento genético por selección masiva, cuatro ciclos de autofecundación y selección por pedigrí. Los progenitores 22021, 22015 y 22006 expresaron frutos tipo saladette, los de 22010 eran alargados, 22003 frutos de tipo pimiento y 22001 producía frutos redondos. Las seis líneas se cruzaron manualmente entre sí, durante el ciclo primavera-verano de 2021 bajo un diseño dialélico Método II, Modelo I de Griffing. Las semillas de los 21 genotipos formados se extrajeron manualmente de frutos maduros.

Establecimiento y conducción del experimento

Los 22 genotipos se sembraron el 13 de junio de 2022 en charolas de poliestireno de 200 cavidades con turba (Kekkilä Professional®, Kekkilä). Una semana después de emerger, las plántulas se regaron con la solución nutritiva de Steiner 25 %; la concentración subió a 50 % después del trasplante y se aplicó al 100 % cuando inició la floración. En todo el ciclo de cultivo el pH de la disolución se mantuvo entre 5.5 y 6.0.

El trasplante se realizó a los 30 días después de la siembra (dds), el 12 de julio de 2022; para ello, se colocó una plántula por cada bolsa negra de polietileno (40 × 40 cm) llena con tezontle, a una densidad de población de 44,444 plantas ha^{-1}. Las plantas se condujeron a un tallo, con podas y tutoreos semanales, y a los 128 dds se despuntaron para detener su desarrollo.

Durante el desarrollo del experimento se realizaron aplicaciones preventivas de fungicidas y plaguicidas con base en el protocolo descrito por Balbuena-Mascada *et al*. (2023), y en la floración, a las 11 horas de cada tercer día, se sacudieron suavemente las plantas para mejorar la polinización.

Los materiales se evaluaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, en condiciones de invernadero e hidroponía, en Montecillo, Texcoco, México (19º 30′ N, 98º 53′ O y 2250 m de altitud). La unidad experimental (UE) constó de 10 plantas.

Registro de variables

En cada planta se registraron: a) días a floración del primer racimo (DAF) contados desde la siembra hasta el día en que la primera flor llegó a antesis, b) días desde la siembra a la madurez (DAM) al momento en que el primer fruto de cada planta llegó a maduración rompiente (Etapa 2), según la escala de colores para tomates frescos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 1992). A los 140 dds, en dos frutos rojos del quinto racimo de cada planta (20 frutos por UE) se obtuvieron los promedios de: c) la longitud (LF, mm) y d) diámetro ecuatorial (DF, mm) del fruto, medidos con un vernier digital milimétrico (Truper®, Caldi-6MP, México), e) peso (PF, g), registrado con una balanza digital (Ohaus®, SP2001, Pine Brook, New Jersey, EUA), f) firmeza (FF, N) cuantificada con un texturómetro (Wagner Force Five® FDV-30, Greenwich, Connecticut, EUA) y punta cónica de 0.8 mm, y g) contenido

de sólidos solubles totales del jugo de tomate (SST, °Brix) con un refractómetro digital (Atago®, PAL-1, Tokio, Japón). Las cosechas fueron a los 143 y 176 dds, y se registró en cada planta, junto con los frutos evaluados a los 140 dds: h) el número de racimos producidos (NR), i) número total de frutos (NTF) y j) peso total de frutos (PTF, g), con una balanza digital (Torrey®, México).

Análisis estadístico

Una vez que se obtuvieron los promedios de cada variable por UE, se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los datos mediante las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Bartlett, respectivamente; posteriormente, se realizó análisis de varianza con el modelo lineal del diseño experimental de bloques completos al azar. La comparación de medias fue mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) con el paquete estadístico SAS® v.9.3 (SAS Institute, 2011).

El análisis del diseño dialélico fue mediante el código macro DIALLEL-SAS05 propuesto por Zhang *et al*. (2005), con base en el Método II de Griffing, Modelo I. Se generó la estructura genética de las cruzas para peso total de frutos (PTF) con el modelo genético estadístico:

$$X_{ij} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + \frac{1}{bc}\sum_{k}\sum_{l} e_{ijkl} \left\{ \begin{matrix} i, j = 1, ..., p \\ k = 1, ..., b \\ l = 1, ..., c \end{matrix} \right\}$$

Donde: *Xij* es el valor observado del genotipo producto de los progenitores i con j, μ es la media general, g_i y g_j son los efectos de ACG de los parentales *i* y *j*, s_{ij} es el efecto de ACE o de la interacción de parentales *i* y *j*, e_{ijkl} es el efecto ambiental en la *ijkl*-ésima observación, o residual.

Las heterosis porcentual con base en el progenitor medio (H_m) se calculó mediante:

$$Hm = (F_1 - PM)/(PM) \times 100$$

Donde F_1 y PM son las medias fenotípicas de la población F_1 y del progenitor medio, respectivamente. PM se calculó como $M = (Pi + Pj)/2$, donde a su vez P_i y P_j son las medias fenotípicas de los progenitores *i* y *j*. La heterosis con base en el mejor progenitor (H_{mp}) se estimó al sustituir el PM por los valores medios del mejor progenitor de cada cruza.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza

Los datos de todas las variables cumplieron los criterios de normalidad y homocedasticidad. El análisis de varianza detectó diferencias estadísticas ($P \leq 0.01$) entre genotipos para todas las variables de estudio (Cuadro 1); esto demuestra que hay diferencias fenotípicas y genéticas entre el germoplasma, necesarias para los programas de mejoramiento genético. Los bajos coeficientes de variación (1.3 a 15.1 %) indican un buen manejo del experimento y confiabilidad de los datos.

Cuadro 1. Cuadrados medios de 10 caracteres agronómicos y de calidad de frutos de 22 genotipos de tomate con distinta forma de fruto y crecimiento indeterminado. Montecillo, México, 2022.

FV	GL	DAF	DAM	LF	DF	PF	SST	FF	NR	NTF	PTF
Bloque	2	1.4^{NS}	7.8*	0.8^{NS}	0.6^{NS}	14.4^{NS}	0.1**	0.7**	0.2^{NS}	146.0**	1667420.8**
Genotipo	21	19.0**	31.1**	292.2**	64.0**	797.4**	0.2**	0.4**	1.1**	112.8**	486974.7**
Error	42	0.6	2.3	2.8	1.6	56.9	0.0	0.1	0.1	16.0	106708.7
Total	65										
R^2		0.93	0.87	0.98	0.95	0.88	0.85	0.76	0.84	0.80	0.75
C.V. (%)		1.4	1.3	2.3	2.3	5.9	2.8	15.1	3.6	7.6	8.1
Media		55.1	115.7	72.3	56.6	127.2	4.7	1.7	9.1	52.3	4056.3

FV: Fuente de variación, GL: grados de libertad, DAF y DAM: días a floración y maduración del primer racimo, LF: longitud, DF: diámetro, PF: peso de fruto, SST: sólidos solubles, FF: firmeza, NR: número de racimos por planta, NTF y PTF: número y peso total de frutos por planta, R^2: coeficiente de determinación, C.V coeficiente de variación, ** y *: significancias con $P \leq 0.01$ y ≤ 0.05, ^{NS}: no significativo.

Comparación de medias

La precocidad es una característica fenológica condicionante del temprano inicio de la reproducción y el paso a la fructificación. Los DAF variaron de 49 a 59 dds (Cuadro 2) y fueron menores que los 57 a 78 dds que Martínez-Vázquez *et al.* (2016) observaron en tomates con HCI en invernadero e hidroponía; en esta variable destacaron los genotipos 22013, 22012, 22011 y 22009 ($P \leq 0.05$) por adelantarse al testigo entre 2.6 y 7 días. Los DAM oscilaron de 109.4 a 121.7 dds y las cruzas 22016 y 22009 fueron más precoces que El Cid® entre 5 y 7 días ($P \leq 0.05$), mientras que 22015 y 22006 resultaron las más tardías.

La longitud, el diámetro y el peso individual del fruto son variables que componen el rendimiento y permiten diferenciar el tipo de tomate. La longitud de frutos varió de 53.1 a 95.7 mm, y sobresalieron los genotipos 22010, 22009, 22014, 22008, 22006 y 22015, con LF mayores que El Cid® ($P \leq 0.05$). El DF osciló de 49 a 67.5 mm; nueve genotipos no se diferenciaron del testigo ($P \leq 0.05$) y solo la cruza 22002 superó a El Cid®. La SCFI (1998) propuso una clasificación de tomates alargados con base en el diámetro ecuatorial de frutos; por lo cual, tres progenitores producen frutos de categoría chica (38 a 52 mm), dos líneas y 12 cruzas producen tomates medianos (51 a 60 mm), y se consideran grandes (59 a 71 mm) los frutos de la línea 22001, el testigo y tres cruzas. En cuanto a PF, la amplitud fue de 89.7 a 158.3 g, y 15 genotipos no fueron estadísticamente diferentes del control ($P \leq 0.05$). Hernández-Ibáñez *et al*. (2017) señalaron que frutos con pesos mayores de 100 g son de categoría comercial si no tienen daños ni desórdenes que demeriten su apariencia; ante esto, todos los materiales estudiados produjeron tomates comercializables, excepto la línea 22021. De Matos *et al*. (2021) registraron en la F_1 de cruzas dobles de tomates PF de100 a 206 g, DF de 50 a 78.4 mm y LF de 53.4 a 71.8 mm.

La firmeza (FF) y el contenido de sólidos solubles totales (SST) son atributos determinantes en las preferencias de los consumidores y de la calidad postcosecha. La firmeza varió de 1.0 a 2.5 N, y 10 genotipos superaron al control ($P \leq 0.05$); los frutos de 22013, 22018, 22015 y 22006 resaltaron por ser mayores de 2.0 N. Los SST variaron de 4.3 a 5.3 °Brix, y coincidieron con los que Vijeth *et al*. (2019) estimaron en un análisis dialélico de tomates en campos de la India. Martínez-Rodríguez *et al*. (2017) señalaron que la concentración de SST en los tomates debe superar los 4.0 °Brix para que sean de calidad para el consumo en fresco. Todos los genotipos cumplieron con este criterio; sin embargo, las líneas 22010 y 22003 superaron a El Cid® ($P \leq 0.05$), y junto con 22015, 22021 y 22017 rebasaron los 5.0 °Brix.

El material vegetal tuvo una producción que varió de 3354.6 a 4654.7 g, de 40 a 62 frutos y de 7.9 a 10.2 racimos/planta. La línea 22015 con las cruzas 22017, 22014, 22018 y 22020 mostraron valores similares a El Cid® y lograron PTF mayores de 4500 g, NTF de 53 a 62 frutos y SST de 4.5 a 5.0 °Brix, LF de 71 a 82 mm, FF de 1.5 a 2.2 N, DAF de 55.3 a 58 dds y más de 9.0 racimos. Estos cinco genotipos y El Cid® produjeron de 200 a 206.7 t ha^{-1} de tomate; sin embargo, 22018, 22014 y 22015 tuvieron frutos de menor diámetro que el control, y 22015 tardó más en madurar (122 dds) ($P \leq 0.05$).

En 2022 el rendimiento promedio nacional de tomate saladette en invernadero fue de 179.6 t ha^{-1} (SIAP, 2023), y los 21 genotipos del dialélico rindieron de 148.9 a 206.7 t ha^{-1} en un ciclo de 176 días. Estas producciones fueron cercanas al intervalo de 145.4 a 198.9 t ha^{-1} reportado en estados con las mayores superficies de tomate bajo invernadero (Guanajuato, Hidalgo, Puebla, Durango, México, Coahuila, Tlaxcala y Oaxaca), con ciclos productivos más largos.

Análisis del diseño dialélico

El análisis de varianza del diseño de Griffing II mostró diferencias estadísticas ($P \leq 0.01$) entre Genotipos y su partición en efectos de ACG y ACE para casi todas las variables (Cuadro 3), lo que sugiere la presencia de efectos aditivos y no aditivos en la expresión fenotípica de esas características (de Matos *et al.*, 2021). Las diferencias estadísticas en los efectos genéticos aditivos son indicadores de variabilidad genética entre los genotipos de los progenitores, por lo que es posible realizar selección entre ellos para incluirlos en programas de mejoramiento genético (Mendoza-de Jesús *et al.*, 2010); especialmente en FF, ya que solo tuvo efectos genéticos aditivos. Kumar *et al.* (2018) también observaron diferencias estadísticas para los efectos de ACG y ACE en las variables PTF, NTF, NR, PF, LF y DF, aunque discreparan en SST. Los bajos coeficientes de variación indicaron buena precisión experimental.

Aptitud combinatoria general

En líneas endogámicas, el efecto de ACG es un indicador de la superioridad de una población y de su divergencia en relación con los otros parentales del dialélico, por lo que a mayor efecto de ACG en una población mayor será el número de genes que aumentan la expresión del carácter y, en consecuencia, serán más las diferencias positivas entre las frecuencias genéticas de la población y el promedio de los parentales del dialélico (Viana, 2000). En este sentido, las líneas 22021 y 22015 podrían seleccionarse como progenitoras de híbridos rendidores por sus valores altos

Cuadro 2. Medias de 10 caracteres agronómicos y de calidad de fruto de 22 genotipos de tomate con diferentes formas de fruto y crecimiento indeterminado, Montecillo, México, 2022.

Gen.	Prog.		DAF	DAM	LF	DF	PF	SST	FF	NR	NTF	PTF
	♀ (i)	♂ (j)	(d)	(d)	(mm)	(mm)	(g)	(°Brix)	(N)			(g)
Líneas y testigo												
22021	1	1	56.8 a-c	114.0 d-h	64.5 j-l	49.5 mn	89.7 j	5.0 a-c	1.4 b-e	9.6 a-d	53.6 a-e	3718.2 a-c
22015	2	2	55.9 b-f	121.7 a	78.4 c-e	55.5 g-k	128.4 c-i	5.0 ab	2.2 ab	10.1 a	53.5 a-e	4563.8 ab
22010	3	3	53.9 e-g	115.9 b-g	95.7 a	48.9 n	129.8 c-i	5.3 a	1.9 a-d	8.4 e-g	45.8 e-g	3868.2 a-c
22006	4	4	56.9 a-c	121.9 a	79.5 cd	50.9 l-n	107.6 ij	4.6 c-f	2.5 a	9.7 ab	61.1 a-c	4090.3 a-c
22003	5	5	56.4 b-e	118.3 a-d	67.6 h-j	58.9 b-g	134.9 a-f	5.3 a	1.4 b-e	9.2 a-f	48.9 c-g	3897.1 a-c
22001	6	6	56.1 b-f	113.0 e-h	53.1 m	62.2 bc	119.1 e-i	4.3 f	1.7 b-e	8.2 fg	40.9 fg	3354.6 c
El Cid	.	.	55.8 b-f	116.9 b-f	72.5 f-h	60.7 b-e	141.7 a-e	4.6 b-f	1.0 e	9.0 b-f	57.4 a-e	4545.7 ab
Cruzas												
22020	1	2	55.3 c-g	118.9 a-c	74.4 d-g	54.1 h-l	120.5 d-i	4.8 b-d	1.6 b-e	10.2 a	61.9 ab	4505.6 ab
22019	1	3	59.1 a	117.6 a-e	77.7 c-f	53.1 j-m	121.4 d-i	4.9 a-d	1.8 a-d	9.0 b-f	56.4 a-e	4367.2 a-c
22018	1	4	58.0 ab	119.4 ab	72.7 f-h	52.5 k-n	110.1 h-j	4.5 d-f	2.0 a-c	9.7 a-c	62.1 a	4584.7 ab
22017	1	5	57.1 a-c	116.2 b-g	70.7 g-i	58.0 d-h	132.2 b-h	5.0 ab	1.5 b-e	9.4 a-e	56.2 a-e	4654.7 a
22016	1	6	54.2 d-g	112.0 gh	61.9 kl	56.8 e-j	110.8 g-j	4.7 b-e	1.4 c-e	9.4 a-e	52.6 a-f	3820.8 a-c
22014	2	3	57.1 a-c	117.2 a-e	82.0 c	53.5 j-l	126.7 c-i	4.7 b-e	1.8 a-d	9.2 a-f	58.6 a-d	4632.6 ab
22013	2	4	53.2 gh	116.4 b-g	75.8 d-g	53.8 i-l	116.4 f-i	4.5 d-f	2.0 a-d	9.4 a-e	54.6 a-e	3830.8 a-c
22012	2	5	50.4 i	113.5 e-h	71.2 gh	62.7 b	153.8 ab	4.9 a-d	1.5 b-e	8.6 d-g	51.9 a-g	4201.9 a-c
22011	2	6	51.2 hi	112.3 f-h	62.8 j-l	60.9 b-d	131.2 b-i	4.7 b-f	1.9 a-d	9.0 b-f	50.0 a-g	3970.7 a-c
22009	3	4	48.8 i	109.4 h	87.3 b	53.9 i-l	133.8 b-g	4.5 d-f	1.8 a-d	8.7 c-g	52.3 a-g	3973.8 a-c
22008	3	5	56.7 a-d	115.1 b-g	82.0 c	56.3 f-k	149.8 a-c	4.8 b-d	1.2 de	8.9 b-f	50.2 a-g	4149.5 a-c
22007	3	6	57.3 a-c	112.3 f-h	65.5 i-k	57.6 d-i	120.3 d-i	4.7 b-e	1.8 a-d	8.4 e-g	45.9 e-g	3694.7 a-c
22005	4	5	54.2 e-g	116.5 b-g	73.3 e-g	59.8 b-f	143.7 a-d	4.8 b-e	1.5 b-e	8.5 e-g	47.4 d-g	3797.8 a-c
22004	4	6	53.9 fg	114.4 c-g	62.7 j-l	58.3 c-g	117.2 f-i	4.4 ef	1.7 b-e	8.9 b-f	49.5 b-g	3622.7 bc
22002	5	6	54.9 c-g	112.2 f-h	59.7 l	67.5 a	158.3 a	4.6 c-f	1.5 b-e	7.9 g	40.0 g	3393.4 c
DSH			2.5	4.7	5.3	4.0	23.6	0.4	0.8	1.0	12.5	1022.6
Media			55.1	115.7	72.3	56.6	127.2	4.7	1.7	9.1	52.3	4056.3

Medias con letras iguales en columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05). Letras separadas por guion indican el intervalo de grupos de medias a los que pertenece el genotipo. Gen: genotipo, Prog: progenitor, DAF y DAM: días a floración y maduración, respectivamente en el primer racimo, LF: longitud de fruto, DF: diámetro, PF: peso, SST: sólidos solubles totales, FF: firmeza, NR: número de racimos, NTF: número total, PTF: peso total de frutos por planta; DSH: diferencia significativa honesta (P ≤ 0.05).

Cuadro 3. Cuadrados medios de 10 caracteres agronómicos y de calidad de frutos de seis líneas de tomate con diferente forma de fruto y hábito de crecimiento indeterminado, y de sus 15 cruzas directas producto del diseño Griffing II, Modelo I, evaluadas en Montecillo, México, en 2022.

FV	GL	PTF	NR	NTF	FF	SST	PF	DF	LF	DAM	DAF
Repeticiones	2	1630161.5**	0.20^{NS}	143.9**	0.6**	0.1**	15.2^{NS}	0.5^{NS}	0.8^{NS}	8.2*	1.3^{NS}
Genotipos	20	473695.9**	1.10**	114.4**	0.3**	0.2**	804.0**	64.6**	306.7**	32.5**	19.9**
ACG	5	1214252.8**	3.10**	348.3**	0.7**	0.5**	2381.0**	207.4**	1015.4**	48.3**	23.5**
ACE	15	261932.8*	0.40**	40.3*	0.1^{NS}	0.1**	300.9**	14.4**	22.7**	25.6**	21.6**
Error	40	110943.4	0.10	16.2	0.1	0.0	58.0	1.7	2.9	2.3	0.6
Media		4052.6	9.05	52.3	1.7	4.7	127.8	56.8	72.2	115.3	55.0
R^2		0.74	0.84	0.80	0.72	0.85	0.87	0.95	0.98	0.88	0.94
CV (%)		8.3	3.60	7.7	15.2	2.8	6.0	2.3	2.3	1.3	1.5

FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, PTF: peso total de frutos, NR: número de racimos, NTF: número total de frutos, FF: firmeza de frutos, SST: sólidos solubles totales; PF, DF y LF: peso, diámetro y longitud de frutos; DAM y DAF: días a maduración y a floración; ACG y ACE: aptitud combinatoria general y específica; R^2: coeficiente de determinación, CV: coeficiente de variación, ** y *: significancias con $P \leq 0.01$ y $P \leq 0.05$, ^{NS}: no significativo.

Cuadro 4. Efectos de aptitud combinatoria general (ACG) para 10 caracteres agronómicos y de calidad de frutos en seis líneas de tomate con diferente forma de fruto y crecimiento indeterminado en Montecillo, México, 2022.

Progenitor	Línea	PTF (g)	NR	NTF	FF (N)	SST (°Brix)	PF (g)	DF (mm)	LF (mm)	DAM (d)	DAF (d)
P1	22021	222.6**	0.5**	4.8**	-0.1	0.1**	-13.7**	-2.8**	-1.9**	1.0**	1.8**
P2	22015	231.6**	0.4**	2.8**	0.1*	0.0	1.7	-0.0	1.9**	1.3**	-1.1**
P3	22010	61.7	-0.3**	-0.8	0.0	0.1**	2.5	-2.9**	9.5**	-0.7*	0.5**
P4	22006	-69.2	0.1	2.2**	0.2**	-0.2**	-6.4**	-1.9**	3.0**	1.0**	-0.8**
P5	22003	-36.9	-0.3**	-3.2**	-0.3**	0.2**	17.6**	3.8**	-1.4**	-0.0	-0.0
P6	22001	-409.8**	-0.4**	-5.8**	-0.1	-0.2**	-1.7	3.8**	-11.2**	-2.6**	-0.4*

PTF: peso total de frutos, NR: número de racimos, NTF: número total de frutos, FF: firmeza de frutos, SST: sólidos solubles totales, PF, DF y LF: peso, diámetro y longitud de frutos, DAM y DAF: días a maduración y a floración. ** y *: significancias con $P \leq 0.01$ y $P \leq 0.05$.

de ACG ($P \leq 0.01$) en PTF, NR y NTF (Cuadro 4); por otra parte, la línea 22021 también ayudaría en la mejora de SST; el parental 22015 contribuiría con aumentos en FF, LF y reduciría los DAF ($P \leq 0.01$). El progenitor 22010 también resaltó por ACG positivas en SST, fue el más alto en LF ($P \leq 0.01$), y tuvo efectos negativos en DAM ($P \leq 0.05$), por lo que aportaría genes que mejoren estos caracteres. Los parentales con efectos altos de ACG en DAF y DAM no son deseables para el mejoramiento genético porque aumentan los periodos desde la siembra a la floración y maduración, y efectos negativos de ACG en estos caracteres los reducen (Graça *et al.*, 2015).

Por otro lado, las líneas 22001 y 22003 no son prospectos para la mejora genética de PTF, NR, NTF, FF ni LF, debido a los efectos bajos de ACG en estas variables ($P \leq 0.01$); por su parte, 22001 ayudaría en la mejora de DAM y DF, y 22003 contribuiría en el aumento de SST, PF y DF. La línea 22006 sería útil como fuente de genes para mejorar la FF, NTF, DAF y LF. En ese sentido, Vijeth *et al.* (2019)

señalaron que el desempeño *per se* del progenitor y la ACG se deben considerar simultáneamente, ya que refuerza su confiabilidad como criterio para la selección de parentales.

Rajkumar *et al*. (2018) observaron variaciones de efectos de ACG en NTF (-6.1 a 6.7 frutos), PF (-15.5 a 12.9 g), PTF (-440 a 700 g) y SST (-0.5 a 0.6 °Brix) ($P \leq 0.01$) al estudiar la aptitud combinatoria de 10 variedades de tomate de HCI en campos de la India; Graça *et al*. (2015) también estimaron ACG en FF de -1.6 a 0.64 N; y Kumar *et al.* (2018) registraron intervalos de ACG en NR (-0.73 a 0.63 racimos), LF (-5.5 a 7.7 mm) y DF (-4.5 a 3.6 mm) en el análisis dialélico de líneas × probador de tomates en India. Las variaciones de efectos de ACG registradas pueden atribuirse a la divergencia genética de las líneas por su origen, tal como observaron Martínez-Vázquez *et al.* (2017) en un análisis dialélico de líneas derivadas de híbridos comerciales y de tomates nativos.

Aptitud combinatoria específica

Viana (2000) señaló que cuando los parentales tienen valores positivos de efectos de ACE hay dominancia unidireccional negativa; por el contrario, cuando las ACE son negativas existe dominancia unidireccional positiva, y cuanto mayor es el valor absoluto de ACE, serán más altas las diferencias entre las frecuencias genéticas en la población y las frecuencias promedio de los progenitores del dialelo, y esto es un indicador de la divergencia de la población con relación al grupo de progenitores; en este sentido, las líneas con los efectos más bajos de ACE, o dominancia unidireccional positiva, fueron 22021 en PTF, NR, NTF, LF, DAM, PF, DF y DAF ($P \leq 0.05$) (Cuadro 5), el parental 22010 en NTF, DF y DAF ($P \leq 0.05$), 22003 en PF y DF ($P \leq 0.01$), y 22001 con 22006 en DF ($P \leq 0.01$). Todos los parentales tuvieron dominancia unidireccional negativa en FF y SST, positiva en PF y DF, y combinaciones de ambas en las variables restantes. Por otro lado, las líneas de mayor divergencia genética, con altos valores absolutos de ACE, fueron 22001 (PTF y NTF), 22003 (NR, PF y DF), 22006 (FF, DAM y DAF) y 22110 (SST y LF), y los parentales 22010 y 22003 destacaron por altos valores absolutos de ACE en PTF.

Los altos efectos de ACG de las líneas 22021 en PTF, NR y NTF, y de 22010 en PTF, SST y LF indican que estos parentales poseen con mayor frecuencia los genes que mejoran esos caracteres, y los grandes valores absolutos de ACE de 22021 en PTF, NTF y LF, y de 22010 en PTF, NTF, SST y LF, apuntan a que son los progenitores de mayor divergencia genética en estas variables. Por estas cualidades, se sugiere aplicar métodos de mejoramiento intrapoblacional a las líneas 22021 y 22010 (Viana, 2000); además, 22010 originó los híbridos 22007, 22014, 22008 y 22019, con efectos positivos de ACE en PTF.

El híbrido 22016 tuvo los efectos de ACE más altos en PTF, NR, NTF y LF ($P \leq 0.01$); seguido por las cruzas 22017 y 22018 en la ACE de PTF ($P \leq 0.05$). Por otro lado, 22009, 22011, 22004 y 22012 resaltaron por los valores negativos en DAF y DAM ($P \leq 0.01$), mientras que 22002 mostró los efectos más altos de ACE en PF, DF y bajos en DAM ($P \leq 0.01$). Estos híbridos podrían emplearse en mejoramiento por heterosis para los caracteres donde tuvieron las mejores ACE (Rajkumar *et al*., 2018).

Las cruzas con efectos positivos de ACE en PTF se obtuvieron de progenitores con ACG altas × bajas (22018, 22017, 22016 y 22011), altas × medias (22014 y 22019) y medias × bajas (22008 y 22007); sin embargo, los híbridos 22013 y 22012 mostraron efectos de ACE negativos en PTF, aunque resultaran del cruzamiento de parentales con ACG altas (línea 22015) × bajas en PTF. En este sentido, Cervantes-Ortiz *et al*. (2018) señalaron que los híbridos de mayor rendimiento podrían resultar del cruzamiento de líneas con altos efectos de ACG; sin embargo, en su estudio, como en el presente, no resultó así, por lo cual se infiere que parentales con altas ACG no necesariamente producen cruzas sobresalientes en rendimiento. Por otro lado, la baja divergencia genética de 22015 en PTF (menor valor absoluto de ACE en PTF) explica la razón por la que las cruzas en las que fue parental de alta ACG tuvieran reducida ACE en PTF.

Las ACE estimadas coinciden con los intervalos que Rajkumar *et al*. (2018) determinaron en PTF, SST y NTF, y con las variaciones que Kumar *et al*. (2018) observaron en NR, LF, DF y en PF; sin embargo, la significancia de la ACE de un carácter no puede tomarse por sí sola como base en el fitomejoramiento, por la posibilidad de crear progenie con menores medias que sus progenitores, ante lo cual es necesario analizar la heterosis y heterobeltiosis (Bdr *et al*., 2020). La heterosis y la ACE son directamente proporcionales, ya que el desempeño medio de los híbridos puede estimarse a partir de la suma de los efectos medios de ACG y ACE de los progenitores (de Souza *et al*., 2012).

Heterosis

Los híbridos 22017, 22018, 22014 y 22020 tuvieron rendimientos mayores de 4500 g por planta y mostraron variaciones en heterosis media (H_m) de 8.8 a 22.2 % en PTF, de 8.2 a 18.1 % en NTF, de -1.8 a 17.7 % en PF, de 2.6 a 7 % en DF y de -5.8 a 7.0 % en LF (Cuadro 6). Las H_m en PTF, PF, DF y LF fueron de -12 a 25 %; de Matos *et al.* (2021) también observaron intervalos de -12 a 107 % en cruzas dobles F_1 de tomates. La dominancia en un parámetro que al reducir sus valores justifica el sentido negativo en

Cuadro 5. Efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) para 10 caracteres agronómicos y de calidad de fruto en seis líneas de tomate con diferente forma de fruto y crecimiento indeterminado y sus 15 cruzas directas. Montecillo, México, 2022.

Genealogía	Genotipo	PTF (g)	NR	NTF	FF (N)	SST (°Brix)	PF (g)	DF (mm)	LF (mm)	DAM (d)	DAF (d)
Líneas											
S11	22021	-779.6**	-0.4*	-8.3**	-0.1	0.1	-10.7*	-1.7*	-4.0**	-3.4**	-1.7**
S22	22015	47.9	0.3	-4.4	0.2	0.2*	-2.8	-1.2	2.3*	3.7**	3.1**
S33	22010	-307.8	-0.1	-4.9*	0.2	0.4**	-3.0	-2.2**	4.5**	2.0*	-2.1**
S44	22006	176.2	0.5*	4.4*	0.3*	0.2*	-7.5	-2.1**	1.2	4.5**	3.5**
S55	22003	-81.8	0.8**	3.0	0.3	0.2*	-28.2**	-5.4**	-1.7	3.0**	1.5**
S66	22001	121.6	-0.0	0.2	0.1	-0.1	-5.3	-2.1**	3.4**	2.9**	1.9**
Cruzas											
S12	22020	-1.2	0.3	2.0	-0.1	-0.0	4.7	0.1	2.1*	1.2	-0.4
S13	22019	30.3	-0.3	0.0	0.1	-0.1	4.8	2.0**	-2.1*	2.0*	1.8**
S14	22018	378.8*	0.0	2.8	0.2	-0.1	2.3	0.4	-0.6	2.1**	2.0**
S15	22017	416.4*	0.1	2.2	0.1	0.0	0.5	0.2	1.8*	-0.1	0.3
S16	22016	735.0**	0.7*	9.6**	-0.1	0.0	9.0	0.7	6.8**	1.7	-0.5
S23	22014	286.6	0.1	4.3*	-0.1	-0.1	-5.3	-0.3	-1.6*	1.3	2.7**
S24	22013	-384.2*	-0.1	-2.7	-0.0	-0.1	-6.7	-1.1	-1.3	-1.2	0.2
S25	22012	-45.5	-0.5**	0.0	-0.1	-0.0	6.7	2.2**	-1.4	-3.2**	-3.4**
S26	22011	48.4	-0.3	5.1	-0.1	-0.1	6.2	1.6	-2.4	-5.4**	-5.4**
S34	22009	-71.3	-0.2	-1.5	-0.1	-0.1	9.9**	1.9**	2.6**	-6.2**	-5.8**
S35	22008	72.0	0.4**	1.8	-0.2	-0.1*	1.9	-1.4*	1.7*	0.6	1.2**
S36	22007	298.0	0.2	5.1	-0.0	-0.3*	-5.4	2.1	-9.5**	-1.7	4.2**
S45	22005	-148.7	-0.4*	-3.9*	-0.2	0.1	4.6	1.1	-0.5	0.2	0.1
S46	22004	-127.1	-0.3	-3.6	-0.5*	-0.2	4.9	1.7	-2.5	-3.8**	-3.5**
S56	22002	-130.8	-1.2**	-6.3	-0.2	-0.4**	42.7**	8.6**	1.9	-3.5**	-1.2

PTF: peso total de frutos, NR: número de racimos, NTF: número total de frutos, FF: firmeza de frutos, SST: sólidos solubles totales; PF, DF y LF: peso, diámetro y longitud de frutos respectivamente, DAM y DAF: días a maduración y a floración respectivamente, ** y *: significancias con $P \leq 0.01$ y $P \leq 0.05$.

Cuadro 6. Heterosis media y heterobeltiosis porcentuales en siete caracteres de rendimiento y calidad de frutos de 15 cruzas de tomates con diferente forma de fruto y crecimiento indeterminado. Montecillo, México, 2022.

Genealogía	Genotipo	Heterosis progenitor medio (%)							Heterosis mejor progenitor (%)						
		PTF	NR	NTF	FF	PF	DF	LF	PTF	NR	NTF	FF	PF	DF	LF
S12	22020	8.8	3.3	15.5	-9.0	10.5	3.0	4.1	-1.3	0.8	15.4	-25.6	-6.1	-2.6	-5.1
S13	22019	15.1	0.1	13.4	8.5	10.6	8.1	-3.0	12.9	-6.2	5.2	-7.1	-6.5	7.4	-18.8
S14	22018	17.4	0.1	8.2	5.3	11.5	4.7	1.1	12.1	-0.5	1.6	-18.2	2.3	3.2	-8.4
S15	22017	22.2	-0.7	9.6	5.6	17.7	7.0	7.0	19.4	-2.6	4.8	4.2	-2.0	-1.6	4.5
S16	22016	8.0	5.5	11.3	-10.4	6.1	1.7	5.3	2.8	-2.1	-1.9	-17.9	-7.0	-8.7	-4.0
S23	22014	9.9	-0.4	18.1	-12.1	-1.8	2.6	-5.8	1.5	-8.9	9.7	-16.9	-2.4	-3.5	-14.3
S24	22013	-11.5	-5.2	-4.8	-13.5	-1.3	1.1	-3.9	-16.1	-7.0	-10.7	-19.0	-9.3	-3.1	-4.6
S25	22012	-0.7	-10.8	1.3	-17.2	16.8	9.6	-2.4	-7.9	-14.6	-3.0	-31.6	14.0	6.4	-9.1
S26	22011	0.3	-1.5	5.9	-2.7	6.0	3.5	-4.5	-13.0	-10.7	-6.6	-14.3	2.2	-2.1	-19.9
S34	22009	-0.1	-4.1	-2.3	-17.0	12.7	8.1	-0.3	-2.8	-10.7	-14.5	-26.2	3.1	5.9	-8.8
S35	22008	6.9	1.4	5.9	-26.8	13.2	4.5	0.4	6.5	-3.2	2.5	-36.7	11.0	-4.4	-14.3
S36	22007	2.3	1.5	5.8	1.7	-3.4	3.7	-12.0	-4.5	0.5	0.0	-5.7	-7.3	-7.4	-31.6
S45	22005	-4.9	-10.3	-13.8	-22.9	18.5	8.9	-0.4	-7.2	-12.6	-22.4	-39.5	6.5	1.5	-7.8
S46	22004	-2.7	-0.6	-2.9	-19.0	3.4	3.1	-5.5	-11.4	-8.3	-19.0	-32.5	-1.6	-6.2	-21.1
S56	22002	-6.4	-9.7	-10.8	-4.3	24.6	11.5	-1.1	-12.9	-14.7	-18.2	-11.3	17.4	8.6	-11.7

PTF, NR y NTF: peso, número de racimos y de frutos totales por planta, FF: firmeza, PF: peso, DF: diámetro y LF: longitud de fruto.

la heterosis de un híbrido con relación al progenitor medio (de Matos *et al*., 2021). Martínez-Vázquez *et al*. (2016) estimaron mayores intervalos de H_m en PTF (-22 a 111 %), NTF (-12 a 59 %) y PF (-13 a 81 %), atribuibles a una mayor divergencia genética entre el material de estudio (tomates nativos tipo pimiento con derivados de híbridos comerciales tipo saladette); sin embargo, coinciden en que los híbridos con más rendimientos y H_m en PTF y NTF no fueron los mismos que en PF.

Los híbridos 22014, 22018, 22017 y 22020 también mostraron heterobeltiosis de -1.3 a 19.4 % en PTF, y de 1.6 a 15.4 % en NTF. Por otro lado, 22019, 22008 y 22016, aunque tuvieron efectos de ACE y H_{mp} positivos en PTF, no lograron rendimientos numéricamente altos, lo que refleja la relevancia de la acción génica no aditiva en la expresión de la heterosis para rendimiento, tal como observaron Mendoza-de Jesús *et al*. (2010) en cinco híbridos de tomate más productivos que sus progenitores. Por otro lado, en nueve de los 15 híbridos hubo H_{mp} negativas en PTF, lo que puede atribuirse a la reducción en NTF y frutos por racimo, además de la baja ACE en PTF (Mendoza-de Jesús *et al*., 2010).

Las líneas 22021 y 22010 tuvieron efectos positivos de ACG y negativos de ACE en PTF, fueron las de mayor divergencia genética entre los progenitores y presentaron dominancia unidireccional positiva en ese caracter. Estas cualidades posiblemente influyeron para que los híbridos que originaron 22014, 22008, 22018, 22017, 22019 y 22016 expresaran H_m y heterobeltiosis positivas en PTF. De Matos *et al.* (2021) encontraron una tendencia similar en las cruzas dobles F_1 de tomates, y Graça *et al*. (2015) también observaron que los parentales con ACG positivas

Cuadro 7. Estructura genética del peso total de frutos de 21 genotipos de tomate con diferente forma de fruto y crecimiento indeterminado. Montecillo, México, 2022.

Genealogía	Genotipo	μ (g)	g_i (g)	g_j (g)	s_{ij} (g)	e_{ijkl} (g)	X_{ij} (g)
S15	22017	4052.6	222.6	-36.9	416.4	0.0	4654.7
S23	22014	4052.6	231.6	61.7	286.6	0.0	4632.6
S14	22018	4052.6	222.6	-69.2	378.8	0.0	4584.7
S22	22015	4052.6	231.6	231.6	47.9	0.0	4563.8
S12	22020	4052.6	222.6	231.6	-1.2	0.0	4505.6
S13	22019	4052.6	222.6	61.7	30.3	0.0	4367.2
S25	22012	4052.6	231.6	-36.9	-45.5	0.0	4201.9
S35	22008	4052.6	61.7	-36.9	72.0	0.0	4149.5
S44	22006	4052.6	-69.2	-69.2	176.2	0.0	4090.3
S34	22009	4052.6	61.7	-69.2	-71.3	0.0	3973.8
S26	22011	4052.6	231.6	-409.8	48.4	47.9	3970.7
S55	22003	4052.6	-36.9	-36.9	-81.8	0.0	3897.1
S33	22010	4052.6	61.7	61.7	-307.8	0.0	3868.2
S24	22013	4052.6	231.6	-69.2	-384.2	0.0	3830.8
S16	22016	4052.6	222.6	-409.8	735.0	-779.6	3820.8
S45	22005	4052.6	-69.2	-36.9	-148.7	0.0	3797.8
S11	22021	4052.6	222.6	222.6	-779.6	0.0	3718.2
S36	22007	4052.6	61.7	-409.8	298.0	-307.8	3694.7
S46	22004	4052.6	-69.2	-409.8	-127.1	176.2	3622.7
S56	22002	4052.6	-36.9	-409.8	-130.8	-81.8	3393.4
S66	22001	4052.6	-409.8	-409.8	121.6	0.0	3354.6

μ: media general, g_i y g_j: efectos de ACG de líneas *i* y *j*, s_{ij}: efectos de ACE de cruzas *ij*, e_{ijkl}: efecto ambiental de la *ijkl*- ésima observación, X_{ij}: peso total de frutos por planta.

y ACE negativas generaron cruzas con H_m positivas en la mayoría de las variables de su estudio.

Estructura genética del rendimiento

La estructura genética del PTF de los 21 genotipos reveló que en siete híbridos los efectos no aditivos fueron mayores que los aditivos, en otros siete ocurrió lo contrario, y en una cruza los aportes fueron similares (Cuadro 7). Los materiales 22017, 22014, 22018, 22015 y 22020 produjeron más de 4500 g por planta, y se derivaron de las líneas 22021 y 22015, con altos efectos de ACG en PTF ($P \leq 0.01$). Falconer y Mackay (1996) explicaron que las expresiones de las cruzas se deben a: 1) la suma de los efectos aditivos de ambos progenitores (híbridos 22020 y 22019), 2) los efectos de la interacción de alelos contrastantes (en 22017 y 22018 la ACE > sumas de ACG), y 3) la sumatoria de los efectos aditivos y de dominancia (en 22014 el efecto de ACE = sumas de ACG).

Los híbridos de alto rendimiento donde preponderan los efectos aditivos (22020 y 22019) podrían mejorarse por selección y después hibridar para incorporar alelos favorables (Martínez-Vázquez *et al*., 2017), y en las cruzas donde destacaron los efectos no aditivos (22017 y 22018) se sugiere hacer mejoramiento genético por hibridación y recombinación, y seleccionar en generaciones posteriores.

La línea 22001 tuvo el menor efecto de ACG en PTF (-410 g**) y originó híbridos con rendimientos menores de 4000 g por planta (22011, 22016, 22007, 22004 y 22002), con variaciones por el efecto residual del modelo de -779.6 hasta 176.2 g; por lo cual, este progenitor no es apto para programas de mejoramiento genético del rendimiento; en cambio, la línea 22015 podría ser una opción como fuente de genes (alta ACG 231.6**) y para la producción comercial (4563.8 g por planta), sin diferencia estadística con el testigo ($P \leq 0.05$). Ello confirma que el desempeño parental *per se* es un parámetro confiable para obtener progenies con alto rendimiento (Hernández-Leal *et al*., 2019), y que la mayor ACG de la línea coincide con su alto rendimiento medio (Vijeth *et al*., 2019). Esto igualmente aplica para la línea 22021 porque originó híbridos productivos, tuvo la segunda mejor ACG (222.6**) y su producción (3718.2 g por planta) no se diferenció del testigo ni de los demás progenitores ($P \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

Las estimaciones de la aptitud combinatoria general y específica, de la heterosis media y heterobeltiosis, y el comportamiento *per se* de los genotipos permitieron identificar a los progenitores 22021 y 22010 como los de mayor divergencia genética, con altas ACG y menores ACE en rendimiento y otras variables; éstos también produjeron los híbridos 22017, 22014, 22018 y 22020, que con la línea 22015 son promisorios para la producción comercial por sus rendimientos y calidad de frutos. Las líneas 22021, 22010 y 22015 podrían incorporarse en programas de mejoramiento para explotar sus efectos aditivos y no aditivos en estas variables.

BIBLIOGRAFÍA

Balbuena-Mascada S., R. Lobato-Ortiz, J. J. García-Zavala, S. Cruz-Izquierdo y E. Rodríguez-Guzmán (2023) Comportamiento de líneas de tomate Saladette con hábito de crecimiento determinado en invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana* 46:367-367, https://doi.org/10.35196/rfm.2023.4.367

Bdr M. F., M. F. Anshori, G. Emanuella, N. Pratiwi, I. Ermiyanti, V. Yovita, ... and N. Nasaruddin (2020) High lycopene tomato breeding through diallel crossing. *Agrotech Journal* 5:63-72, https://doi.org/10.31327/atj.v5i2.1347

Cervantes-Ortiz F., J. Hernández-Esparza, J. G. García-Rodríguez, J. A. Rangel-Lucio, E. Andrio-Enríquez, M. Mendoza-Elos, ... y D. Rodríguez-Mercado (2018) Aptitud combinatoria general y específica de caracteres agronómicos en líneas de maíz (*Zea mays* L.) de baja endogamia. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences* 34:33-42, https://doi.org/10.4067/S0719-38902018005000204

de Matos R., J. T. V. de Resende, A. R. Zeist, L. E.-D. Corte, P. R. Da-Silva and D. M. Zeffa (2021) Performance of the double-cross tomato hybrids from a partial diallel. *Ciência e Agrotecnologia* 45:e027320, https://doi.org/10.1590/1413-7054202145027320

de Souza L. M., M. E. A. G. Z. Paterniani, P. C. T. de Melo and A. M. T. de Melo (2012) Diallel cross among fresh market tomato inbreeding lines. *Horticultura Brasileira* 30:246-251, https://doi.org/10.1590/S0102-05362012000200011

Falconer D. S. and T. F. C. Mackay (1996) Introduction to Quantitative Genetics. 4th edition. Addison Wesley Longman Limited. Essex, UK. 464 p.

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2024) FAOSTAT, Cultivos y productos de ganadería-Tomates frescos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italy. https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL (Mayo 2024)

Gayosso-Barragán O., A. López-Benítez, S. A. Rodríguez-Herrera, J. N. Ek-Maas, D. M. Hidalgo-Ramos and J. S. G. J. Alcala-Rico (2019) Studies on combining ability in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Agronomy Research* 17:77-85, https://doi.org/10.15159/AR.19.002

Graça A. J. P., A. T. Amaral Júnior, R. Rodrigues, L. S. A. Gonçalves, C. P. Sudré, M. Vivas and P. C. T. Melo (2015) Heterosis and combining ability of dual-purpose tomato hybrids developed to meet family farmers' needs in Brazil and Mozambique. *Horticultura Brasileira* 33:339-344, https://doi.org/10.1590/S0102-053620150000200010

Hernández-Ibáñez L., J. Sahagún-Castellanos, J. E. Rodríguez-Pérez y M. G. Peña-Ortega (2017) Predicción de rendimiento y firmeza de fruto de híbridos de tomate con BLUP y RR-BLUP mediante marcadores moleculares ISSR. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 23:21-33, https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2016.06.021

Hernández-Leal E., R. Lobato-Ortiz, J. J. García-Zavala, A. Hernández-Bautista, D. Reyes-López and O. Bonilla-Barrientos (2019) Stability and breeding potential of tomato hybrids. *Chilean Journal of Agricultural Research* 79:181-189, https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000200181

Kumar K., D. Sharma, J. Singh, T. K. Sharma, V. K. Kurrey and R. R. Minz (2018) Combining ability analysis for yield and quality traits in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 7:1002-1005, https://doi.org/10.5539/jas.v5n2p213

Martínez-Rodríguez O. G., Á. Can-Chulim, E. Cruz-Crespo y J. D. García-Paredes (2017) Influencia del riego y sustrato en el rendimiento

y calidad de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8:53-65, https://doi.org/10.29312/remexca.v8i1.71

Martínez-Vázquez E. Á., R. Lobato-Ortiz, J. J. García-Zavala y D. Reyes-López (2016) Heterosis de cruzas entre líneas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) nativo mexicano tipo pimiento y líneas tipo saladette. *Revista Fitotecnia Mexicana* 39:67-77, https://doi.org/10.35196/rfm.2016.1.67-77

Martínez-Vázquez E. Á., A. Hernández-Bautista, R. Lobato-Ortiz, J. J. García-Zavala and D. Reyes-López (2017) Exploring the breeding potential of Mexican tomato landraces. *Scientia Horticulturae* 220:317-325, https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.03.031

Mendoza-de Jesús V., J. Sahagún-Castellanos, J. E. Rodríguez-Pérez, J. P. Legaria-Solano, A. Peña-Lomelí y M. Pérez-Grajales (2010) Heterosis intervarietal en tomate de crecimiento indeterminado tipo saladete. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 16:57-66, https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2010.16.007

Rajkumar G., V. Premalakshmi, V. Thiruvengadam and P. I. Vethamoni (2018) Combining ability analysis of indeterminate tomato F_1 hybrids suitable for polyhouse cultivation. *Electronic Journal of Plant Breeding* 9:1157-1162, https://doi.org/10.5958/0975-928X.2018.00144.8

Reddy B. R., A. K. Singh, A. K. Pal, Y. S. Reddy and G. E. Reddy (2020) Combining ability and heterosis studies in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) for quality traits and yield. *International Journal of Chemical Studies* 8:2788-2792, https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i2aq.9170

SAS Institute (2011) SAS/STAT® 9.3 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 1108 p.

SCFI, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (1998) Norma Mexicana NMX-FF-031-1997-SCFI Productos alimenticios no industrializados para consumo humano - hortalizas frescas - tomate - (*L. esculentum* Mill.)- Especificaciones. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México, D. F. http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/1998/nmx-ff-031-1998.pdf (Junio 2024).

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023) Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/ (Octubre 2023).

SNICS, Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (2022) Catálogo Nacional de Variedades Vegetales 2022. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. http://www.gob.mx/snics/articulos/catalogo-nacional-de-variedades-vegetales-cnvv-2022 (Julio 2024).

USDA, United States Department of Agriculture (1992) Color classification requirements in United States standards for grades of fresh tomatoes. United Fresh Fruit and Vegetable Association-USDA Agricultural Marketing Service. Lansing, Michigan, USA. 16 p.

Viana J. M. S. (2000) The parametric restrictions of the Griffing diallel analysis model: combining ability analysis. *Genetics and Molecular Biology* 23:877-881, https://doi.org/10.1590/S1415-47572000000400029

Vijeth S., M. S. Dhaliwal, S. K. Jindal, N. Garg, P. Kaushik and A. Sharma (2019) Diallel analysis of elite tomato lines comprising leaf curl virus resistance genes. *Applied Ecology and Environmental Research* 17:6457-6471, https://doi.org/10.15666/aeer/1703_64576471

Zhang Y., M. S. Kang and K. R. Lamkey (2005) DIALLEL-SAS05: a comprehensive program for Griffing´s and Gardner-Eberhart analyses. *Agronomy Journal* 97:1097-1106, https://doi.org/10.2134/agronj2004.0260