

## 12. Análisis de la aptitud combinatoria y de la heterosis en chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.)



IMELDA MARTINEZ ESTRADA\*

JAIME MEJÍA CARRANZA\*\*§

ANDRÉS GONZÁLEZ HUERTA\*\*\*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.299.12>

### Resumen

Las cruzas dialélicas han sido usadas como una herramienta útil para investigar la aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE), para identificar progenitores superiores y cruzas sobresalientes, y para predecir el comportamiento potencial en nuevo material genético. En esta investigación se estimó la ACG en seis poblaciones de chile Manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.), la ACE de sus 15 cruzas y la heterosis. El experimento se hizo en un invernadero del Centro Universitario Tenancingo de la Universidad Autónoma del Estado de México. Se establecieron 21 tratamientos en hileras en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones; la distancia entre plantas y entre hileras fue de 0.6 y 2.0 m, respectivamente. Se midieron días a emergencia (DE), altura de planta (ADP), ancho de planta (AP), días a floración (DFL), flores por planta (NFL), días a fructificación (DFR) y peso promedio del fruto (PIF). Los efectos de ACG y ACE se estimaron con el método 2 de Griffing. La heterosis se estimó con la media

---

§ Autor para correspondencia: [jmejia@uaemex.mx](mailto:jmejia@uaemex.mx)

\* Maestra en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por el Centro Universitario Tenancingo, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8057-6426>

\*\* Doctor en Genética y Biología de Estrés de Cultivos Vegetales. Profesor de tiempo de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3876-0788>

\*\*\* Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6055-7597>

de ambos progenitores y con el mejor de ellos. En los progenitores identificados como P1 a P10 se estimaron efectos de *gi* negativos en DFL y DFR que influyeron en mayor precocidad a la producción. Los efectos de ACE fueron positivos en PIF en la cruza P3 × P8, y negativos en DE, DFL y DFR en P10 × P7 y P10 × P8; P10 × P8 fue más precoz que la variedad comercial P3. P10 × P6 mostró 60% de heterosis con respecto a la media de sus progenitores en NFL. En DFR, P3 × P8 tuvo una heterosis de 9.43% respecto al mejor de sus padres. Los resultados anteriores indicaron que los progenitores podrían utilizarse en nuevos programas de mejoramiento genético por selección para el desarrollo de poblaciones sobresalientes.

**Palabras clave:** *Método 2 de Griffing, modelo I, variabilidad genética, selección, hibridación.*

## Introducción

México, en superficie cultivada de chile (*Capsicum* spp.) ocupa el tercer lugar a nivel mundial, después de China e Indonesia; se siembran 92 292.22 ha y cosechan 2 718 211.88 t (Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta [Siacon], 2018). Entre las especies más cultivadas destacan *Capsicum annum* L., con las variedades Jalapeño (29 000 ha), Poblano (17 000 ha), Serrano (13 000 ha) y Guajillo (6 000 ha); *Capicum chinensis*, con chile Habanero (847.86 ha); y *C. pubescens* Ruiz y Pavón con chile Manzano (490.5 ha). Esta última se cultiva en sistema tradicional a cielo abierto en 438 ha y de manera intensiva bajo invernadero en 52.5 ha, principalmente para exportación (Siacon, 2018; Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria [Senasica], 2019); *C. pubescens* se cultiva entre 1 300 y 3 000 msnm (Montes, 2010) en Michoacán, Puebla, Veracruz y el Estado de México (Aguilar et al., 2010); en este último, la producción se concentra en Coatepec Harinas, Texcaltitlán, Villa Guerrero y Tenancingo.

El rendimiento en chile Manzano cultivado a cielo abierto es de 14.11 t ha<sup>-1</sup>, pero bajo invernadero y con manejo agronómico para exportación se alcanzan hasta 75 t ha<sup>-1</sup> (Pérez y Castro, 2008), y se vende entre 2.0 y 4.0

dólares por kilo (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [Sader], 2013). Esta especie tiene un alto valor nutritivo y también posee propiedades útiles para la industria farmacéutica (Antonius et al., 2006). La producción de *C. pubescens* en el sur mexiquense, se fundamenta en el uso de genotipos criollos contrastantes en forma, tamaño del fruto y tolerancia a enfermedades, entre otros caracteres (Vallejo et al., 2018), los cuales repercuten directamente en el rendimiento. En este contexto, la caracterización morfológica, fisiológica y molecular son importantes para hacer inferencias sobre su potencial genético y para identificar lo más sobresaliente (Borgi y Baldi, 1970; Cervantes, 2010).

Las cruzas dialélicas se han utilizado para estimar ACG y ACE y para determinar el valor genético de un grupo élite de progenitores y de sus cruzas (Sprague y Tatum, 1942; González et al., 2007a y 2007b; Guillen et al., 2009) de tal manera que puedan ser usados en el desarrollo de mejores cultivares (Yan y Hunt, 2002) o en la predicción del comportamiento potencial en nuevo un material genético (González et al., 2007a y 2007b). En los últimos 70 años se han diseñado y aplicado varios métodos para el análisis de cruzas dialélicas, como los de Jinks y Hayman (1953), y Jinks (1954), pero los más usados han sido los de Griffing (1956).

Otro parámetro genético que debe evaluarse es la heterosis o vigor híbrido, orientado a la determinación de la superioridad en crecimiento, tamaño, rendimiento y calidad, entre otros caracteres, que las progenies deben manifestar con relación a sus progenitores o al mejor de ellos (Moll et al., 1962; González et al., 2007a), cómo en el género *Capsicum* donde se observó un incremento en el rendimiento y en la concentración de capsaicina (8-metil-N-vanillil-6-nonenamida) (Souza y Maluf, 2003; Seneviratne y Kannangara, 2004). A pesar del incremento en la superficie cultivada del chile Manzano en los últimos 5 años, existen serios problemas que aquejan su productividad y calidad, como la heterogeneidad que causan los efectos ambientales, de manejo agronómico, los paquetes tecnológicos y los daños que originan las plagas y las enfermedades, entre otros. Por lo tanto, es deseable definir su estructura genética para evaluar, identificar y recomendar comercialmente a los progenitores y cruzas más sobresalientes. El objetivo principal de esta investigación fue estimar la

ACG y ACE en Chile Manzano, así como la heterosis relacionada con algunos componentes del rendimiento del fruto.

## **Materiales y métodos**

### **Ubicación**

Esta investigación se realizó en el Centro Universitario Tenancingo, de la Universidad Autónoma del Estado de México, ubicado a 18° 58' 05.53" de latitud norte y 99° 36' 50.51" de longitud oeste, a 2 065 msnm.

### **Material biológico**

Se utilizaron muestras de seis poblaciones, contrastantes en forma, color y rendimiento de fruto (tabla 12.1).







### **Derivación de las cruzas**

Al aplicar  $p(p-1)/2$ , donde  $p=6$  es el número de progenitores elegido (Reyes, 1982), de mayo a octubre del 2017 se formaron 15 cruzas. En el progenitor femenino se eligieron botones florales con tres días previos a la apertura, emasculados por desprendimiento mecánico de anteras indehiscentes. Del progenitor masculino se utilizaron flores completamente abiertas con anteras dehiscentes y abundantes en polen. La polinización en los estigmas se hizo por fricción suave de la antera, previamente desprendida por su filamento de la flor. Las cruzas fueron protegidas durante ocho días con bolsas de glassine, para evitar contaminación con polen extraño.

## Recolección de frutos y siembra de semilla híbrida

Los frutos se cosecharon en madurez fisiológica, identificada por uniformidad en la coloración típica del pericarpio, y de estos se extrajo la semilla que se sembró en laboratorio en charolas negras de polietileno con turba (Kekkila) y agrolita en una relación 1:1 (v/v).

Tabla 12.1. Descripción de los seis progenitores utilizados en este estudio

<i>Progenitor</i>	<i>Color</i>	<i>Número de lóculos</i>	<i>Peso promedio del fruto</i>
P1		2	45-60 g
P3		3	45-65 g
P6		3	40-50 g
P7		2	45-68 g
P8		3	40-50 g
P10		3	40-60 g

Fuente: Elaboración propia.

## Trasplante

Se hizo en invernadero a los 62 días de la siembra, cuando las plántulas, de 15 cm en promedio, presentaron ocho hojas verdaderas. Se colocó una plántula por bolsa de plástico negro de 45 cm, y con 80% de tezontle rojo de granulometría entre 0.5 y 1.0 cm de diámetro.

## Diseño y conducción del experimento

Las plantas de los seis progenitores y de sus 15 cruzas (tratamientos) se establecieron en hileras separadas a 2.0 m, con distancia entre plantas de 0.6 m, en un diseño experimental de bloques completos al azar con cinco repeticiones por tratamiento. La unidad experimental fue una bolsa de plástico conteniendo una planta. Las condiciones ambientales del invernadero fueron intensidad lumínica promedio de  $60 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , humedad relativa de 50-75% y temperatura promedio de 24 °C, con oscilaciones desde 5 a 36°C. El suministro de agua y la aplicación de la fertilización se hicieron como lo sugirió Steiner (1984), a 100%, suministrado en riego por goteo. Complementariamente, se aplicaron dosis foliares de 19N–19P–19K cada 15 días. El control de mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum* Westwood), trips (*Frankliniella occidentalis* Pergande), araña roja (*Tetranychus urticae* Koch) y ácaro blanco (*Polyphagotarsonemus latus* Bancs), se hizo con abamectinas, cipermetrinas, mancoceb, zineb, benomilo, prochloraz, en dosis recomendada por el fabricante.

## Variables medidas

Se evaluaron días a emergencia de plántula (DE), altura de planta (ADP, en centímetros), ancho de planta (AP, en centímetros), días a floración (DFL), flores por planta (NFL), días a fructificación (DFR) y peso promedio del fruto (PIF, en gramos).

## Análisis estadístico

Se hizo un análisis dialélico y cuando hubo diferencias significativas entre tratamientos se hizo la comparación de medias entre todas las parejas diferentes de progenitores y cruzas con la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ). Los efectos de ACG y ACE se estimaron con el método 2 de Griffing (1956), modelo I. Estos análisis estadísticos se efectuaron con el Sistema para Análisis Estadístico (SAS, versión 6.01) y con InfoStat (versión 2017), ambos para ambiente Windows; las salidas fueron verificadas con el programa de Zhang y Kang (1997), modificado por los autores del presente capítulo. El análisis de componentes principales, para representar las interrelaciones entre variables y tratamientos, se hizo con InfoStat. En los componentes 1 y 2 del biplot se representó el mayor porcentaje de la variabilidad fenotípica total.

## Heterosis

Se estimó con la media de los padres,  $P_1$  y  $P_2$  (H), y con el mejor de ellos,  $PS$  (HB) (Fehr, 1987; Falconer y Mackay, 1996; González et al., 2007a).

$$(1) H = \left[ \frac{F_1 - \left(\frac{P_1 + P_2}{2}\right)}{\left(\frac{P_1 + P_2}{2}\right)} \right] 100$$

$$(2) HB = \left[ \frac{F_1 - PS}{PS} \right] 100$$

Los cálculos de heterosis fueron verificados con TNAUSTAT software; con este se estimaron los efectos y varianzas de ACG y ACE para el método 2 de Griffing (1956), modelos I y II, respectivamente, cuando se utiliza DOSBOX software, que se transforma en plataforma y vínculo entre MS DOS y Windows.

## Resultados y discusión

La estratificación del área de trabajo, colocando las unidades experimentales en sentido perpendicular al principal gradiente de variación, fue eficiente

para disminuir la heterogeneidad dentro de las repeticiones; sólo se detectaron diferencias significativas entre bloques ( $p = 0.05$ ) en el peso promedio del fruto (PIF). Los coeficientes de variación (CV) fueron del 2.25 a 25.86%. Este hecho es importante para reducir el error experimental y, principalmente, para probar confiablemente las pruebas de hipótesis relacionadas con las fuentes de variación de interés en una tabla dialéctica (tabla 12.2). Resultados similares se encontraron en chiles nativos de Oaxaca, pero con CV superiores a 30% en número y peso de frutos por planta, lo que muestra que los progenitores e híbridos difirieron fenotípicamente en una o más características (Martínez et al., 2014). En otros estudios realizados en *C. annuum* hubo CV entre 2.38 y 35.76% (Chakrabarty et al., 2019).

Tabla 12.2. Cuadrados medios y significancia estadística de los valores de *F*

Fuente de variación	G. L.	DE	AP	ADP	DFL	NFL	DFR	PIF
Repeticiones	4	2.46ns	130.59ns	112.36ns	10.60ns	344.8ns	335.5ns	152.6*
Cruzas	20	4.39**	1251.77**	392.15**	1686.86**	441.4**	1640.8**	220.6**
ACG	5	1.44ns	1742.93**	568.52**	1854.91**	606.4**	1850.5**	326.8**
ACE	15	5.37**	1088.04**	333.36**	1630.85**	386.4*	1570.9**	185.3**
Error	80	1.27	112.48	86.87	15.83	185.8	368.2	61.1
MA		12.91	76.52	100.87	176.83	52.71	193.44	50.50
CV (%)		8.76	13.86	9.24	2.25	25.86	9.92	15.48

Nota.:DE=días a emergencia; AP=ancho de planta; ADP=altura de planta; DFL=días a floración; NFL=flores por planta; DFR=días a fructificación; PIF=peso promedio del fruto; G.L.=grados de libertad; ACG=aptitud combinatoria general; ACE=aptitud combinatoria específica; MA=media aritmética; CV=coeficiente de variación; \* o \*\* = significativo al 0.05 o 0.01, respectivamente.

Fuente: Tesis doctoral de Imelda Martínez Estrada (2020).

Los efectos entre tratamientos (progenitores más cruzas) fueron altamente significativos ( $p = 0.01$ ) en todas las variables. Este hecho indica que existe variabilidad fenotípica importante que debe ser analizada con otras metodologías estadísticas, como la prueba de Tukey, el método 2 de Griffing y el cálculo del vigor híbrido, para identificar una fracción superior del material genético para recomendación en otros estudios genéticos o para generar, validar, aplicar o transferir tecnología (González et al., 2007a y 2007b).

Tabla 12.3. Efectos de  $gi$  y  $Sij$  para seis progenitores y sus 15 cruzas, respectivamente

Progenitor/ cruza	DE	AP	ADP	DFL	DFR	NFL	PIF
P10	0.19	11.34**	0.02	-11.77**	-2.63	0.35	0.34
P3	-0.03	-8.91**	4.02*	6.23**	-5.25	-3.62	3.92*
P6	0.09	-2.21	2.92	6.18**	8.63*	0.58	-1.78
P7	0.14	-0.86	1.07	3.08**	6.90	-5.40*	1.79
P8	-0.33	1.74	-1.50	-1.72*	0.95	4.40	-4.36*
P1	-0.06	-1.11	-6.55**	-1.97*	-8.60*	3.70	0.09
P10xP3	1.15*	-10.36*	16.64**	13.58**	22.45**	-7.84	4.85
P10xP6	-0.18	1.54	9.34*	10.83**	0.57	23.16**	-3.45
P10xP7	-1.83**	28.19**	-11.01**	-9.67**	-26.50**	-1.06	-6.43
P10xP8	-1.15*	22.39**	-12.84**	-40.07**	-21.15	-5.46	-8.48*
P10xP1	-1.03*	19.84**	1.01	-37.82**	-11.00	-9.56	-8.13*
P3xP6	-0.95	1.19	1.34	-4.97**	7.20	-1.86	-5.63
P3xP7	1.20*	-3.96	4.79	-1.87	10.92	2.11	-4.80
P3xP8	1.07*	0.24	0.36	0.93	10.87	2.11	4.15
P3xP1	-0.40	7.89	1.21	1.18	22.42**	0.41	-5.90
P6xP7	0.07	3.94	-0.11	-1.82	-4.95	7.31	0.30
P6xP8	-0.65	-4.06	2.66	1.58	-3.00	0.91	-1.35
P6xP1	0.67	5.19	-0.89	1.83	5.55	1.81	4.00
P7xP8	-0.30	-3.81	6.31	6.08**	2.72	-8.51	-2.93
P7xP1	0.42	-3.96	6.96	2.33	12.27	3.59	1.22
P8xP1	0.70	-2.36	1.34	9.73**	-2.78	0.79	3.77
SE $gi$	0.1631	1.5308	1.3453	0.5744	2.7698	10.5145	1.1285
SE $Sij$	0.4479	4.2042	3.6948	1.5775	7.6072	40.1184	3.0994

Nota. \*, \*\* Significativo a 5 o 1%, respectivamente. SE  $gi$  y SE  $Sij$ , errores estándar para la comparación de efectos genéticos entre progenitores o cruzas, respectivamente.

Fuente: Tesis doctoral de Imelda Martínez Estrada, 2020.

Los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) que se observaron en los progenitores en la tabla dialéctica fueron altamente significativos ( $p = 0.01$ ), excepto en días a emergencia de plántula (DE) (tabla 12.2). Estos resultados fueron verificados al fraccionar la estructura genética de los progenitores por medio de sus estimaciones de  $gi$  o  $gj$  (tabla 12.3). Pérez et al. (2009) reportaron resultados similares. Si existe poca variabilidad fenotípica entre progenitores o menor diversidad genética entre ellos, hay menor probabilidad de detectar alelos aditivos significativos (González et

al., 2007a y 2007b; El-Badawy, 2013). Estos hechos sugieren que es posible iniciar un programa de mejoramiento aplicando alguna técnica de selección en los progenitores más sobresalientes, debido a que los efectos genéticos aditivos fueron más importantes en la determinación de su estructura genética (tablas 12.2 y 12.3).

Valores de ACG positiva para rendimiento, longitud y peso de fruto también han sido reportados por otros investigadores (Chakrabarty et al., 2019; Cervantes-Ortiz et al., 2016) si en una población Estos son mayores que los de ACE, es más recomendable su mejoramiento por selección recurrente para seguir acumulando genes deseables. También lo son para ampliar la diversidad genética en el germoplasma y para predecir confiablemente el comportamiento fenotípico promedio en las progenies de las cruzas que surjan entre los progenitores más deseables (González et al., 2007a y 2007b).

Los efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) que se detectaron en la tabla dialélica también fueron altamente significativos ( $p = 0.01$ ) en todas las variables. Estos resultados son verificables al observar las estimaciones de *Sij* que se muestran en la tabla 12.3. Pérez et al. (2009) coincidieron en la estimación de efectos no aditivos significativos en tamaño del fruto en chile Manzano. Este hecho sugiere la formación de híbridos a partir de poblaciones contrastantes y indica que hay heterosis en el material más sobresaliente, la misma que tiene relación directa con genes no aditivos. Desafortunadamente, el método 2 de Griffing (1956) no permite separar la contribución de la epistasis y de la dominancia (González et al., 2007a y 2007b; El-Badawy, 2013).

En peso promedio del fruto (PIF) los mejores tratamientos correspondieron a los progenitores P10, P3 y P7 (62, 62 y 60 ); los híbridos más sobresalientes (entre 50.0 y 59.6 g), iguales estadísticamente a ellos, fueron P10 × P3, P3 × P7, P3 × P8, P6 × P7, P6 × P1, P7 × P1 y P8 × P1; estos se agruparon estadísticamente de la misma manera en DE (tabla 12.4). Este hecho subraya la importancia de identificar material genético con más días a emergencia de la plántula, como un indicador confiable de plantas con mayor ciclo biológico o reproductivo, que contribuya a favorecer frutos más grandes (tabla 12.4). Hasanuzzaman et al. (2013), en investigaciones realizadas en híbridos de *C. annuum*, también reportaron una disminución en días a floración.

En los híbridos, al haber más flores y frutos, se incrementa la competencia *inter e intra* planta por los fotoasimilados, condición que puede limitar su crecimiento individual, pero una práctica de aclareo podría contribuir a un mejor llenado de fruto (Rodríguez et al., 2015), o también se puede aplicar un mejor paquete tecnológico para aumentar la producción por planta (González et al., 2007a y 2007b; Cedeño et al., 2018).

Tabla 12.4. Comparación de medias entre tratamientos (padres y cruzas)

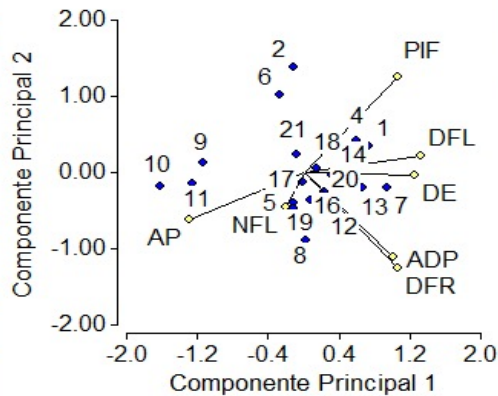
Núm. de tratamiento	DE	ADP	AP	DFL	NFL	DFR	PIF
1. P10	14.8 a	99.4 bcde	68.4 cd	184.8 a	53.8 ab	206.0 ab	62.0 a
2. P3	11.8 bc	96.8 bcde	61.2 d	184.8 a	48.0 ab	146.0 c	62.0 a
3. P6	13.6 abc	100.6 a-e	68.2 cd	185.4 a	38.2 b	208.0 a	50.0 abc
4. P7	13.4 abc	99.6 bcde	64.6 cd	185.4 a	40.2 b	210.0 a	60.4 ab
5. P8	12.4 abc	99.0 bcde	73.8 cd	184.2 a	66.6 ab	202.0 ab	44.2 abc
6. P1	12.6 abc	83.0 e	61.0 d	184.2 a	61.6 ab	163.0 bc	53.2 abc
7. P10xP3	14.2 ab	121.6 a	68.6 cd	184.8 a	41.6 b	208.0 a	59.6 ab
8. P10xP6	13.0 abc	113.2 ab	87.2 bc	182.0	76.8 a	200.0 ab	45.6 abc
9. P10xP7	11.4 c	91.0 cde	115.2 a	158.4 b	46.6 ab	171.2 abc	46.2 abc
10. P10xP8	11.6 bc	86.6 de	112.0 a	123.2 c	52.0 ab	170.6 abc	38.0 c
11. P10xP1	12.0 bc	95.4 bcde	106.6 ab	125.2 c	47.2 ab	171.2 abc	42.8 bc
12. P3xP6	12.0 bc	109.2 abc	66.6 cd	184.2 a	47.8 ab	204.0 ab	47.0 abc
13. P3xP7	14.2 ab	110.8 abc	62.8 cd	184.2 a	45.8 ab	206.0 ab	51.4 abc
14. P3xP8	13.6 abc	103.8 a-e	69.6 cd	182.2 a	55.6 ab	200.0 ab	54.2 abc
15. P3xP1	12.4 abc	99.6 bcde	74.4 cd	182.2 a	53.2 ab	202.0 ab	48.6 abc
16. P6xP7	13.2 abc	104.8 abcd	77.4 cd	184.2 a	55.2 ab	204.0 ab	50.8 abc
17. P6xP8	12.0 bc	105.0 abcd	72.0 cd	182.8 a	58.6 ab	200.0 ab	43.0 bc
18. P6xP1	13.6 abc	96.4 bcde	78.4 cd	182.8 a	58.8 ab	199.0 ab	52.8 abc
19. P7xP8	12.4 abc	106.8 abcd	73.6 cd	184.2 a	43.2 b	204.0 ab	45.0 abc
20. P7xP1	13.4 abc	102.4 a-e	70.6 cd	180.2 a	54.6 ab	204.0 ab	53.6 abc
21. P8xP1	13.2 abc	94.2 bcde	74.8 cd	182.8 a	61.6 ab	183.0 abc	50.0 abc

Nota.: DE = días a emergencia; AP = ancho de planta; ADP = altura de planta; DFL = días a floración; DFR = días a fructificación; NFL = flores por planta; PIF = peso promedio del fruto; CV = coeficiente de variación; DMSH = Diferencia Mínima Significativa Honesta. Las medias de tratamiento dentro de cada columna, identificadas con la misma literal, son iguales estadísticamente (Tukey,  $p=0.05$ ).

Fuente: Tesis doctoral de Imelda Martínez Estrada (2020).

La superioridad que mostraron las tres cruzas sobresalientes y, particularmente  $P_{10} \times P_3$ , se atribuye a que tuvieron más días a floración (DFL) y a fructificación (DFR), menos flores por planta (NFL), y mayor anchura (AP) y porte de planta (ADP) (tabla 12.4; gráfica 12.1). En chiles nativos de Oaxaca, floración y fructificación en híbridos derivados a partir de estos fue ligeramente más tardía que en sus progenitores (Martínez et al., 2014).

Gráfica 12.1. Biplot que muestra las interrelaciones entre los tratamientos (en números), y las variables (en letras)



Fuente: Tesis doctoral de Imelda Martínez Estrada (2020).

Sin embargo, los efectos de  $S_{ij}$  para  $P_{10} \times P_3$  sólo fueron positivos y significativos en DE, ADP y DFL, y negativos y significativos en AP. En  $P_{10}$  las estimaciones de  $g_i$ , positivas y significativas, se observaron en AP, y estas fueron negativas y significativas en DFL. En  $P_3$ , los valores de  $g_j$ , positivos y significativos, se registraron en ADP, PIF, y DFL, y éstos fueron negativos y significativos en AP (tabla 12.4).

$P_3 \times P_8$ , la segunda mejor cruza en PIF, también se agrupó similarmente con  $P_{10} \times P_3$  en las otras variables evaluadas, con excepción de ancho de planta (AP), donde ambas difirieron estadísticamente.  $P_3$  tuvo valores de  $g_i$  positivos y significativos en ADP, DFL, y PIF, y negativos y significativos en AP, DFR y NFL. En  $P_8$  las estimaciones de  $g_j$  fueron negativas y significativas en DFL y PIF. En las progenies generadas con ambos padres sólo en DE los efectos de  $S_{ij}$  fueron positivos y significativos (tabla 12.3).

$P_7 \times P_1$ , la tercera mejor cruza en PIF, se comportó estadísticamente de

manera similar a  $P_3 \times P_8$ . Las estimaciones para  $g_i$  en  $P_7$  fueron positivas y significativas en DFL, y negativas y significativas en NFL. Los efectos de  $g_j$  en  $P_1$  fueron negativos y significativos en ADP, DFL y DFR, pero no en  $S_{ij}$  en ninguna variable (tabla 12.3).

En ADP,  $P_{10} \times P_3$  superó estadísticamente a la media de sus padres (H) en 23.9%. Esta misma condición se observó en DFR (H = 18.8%). Con relación al mejor progenitor (HB), sólo hubo diferencias significativas en ADP (22.3%). En DE y DFR,  $P_3 \times P_8$  fue significativamente mejor que sus progenitores (H = 12.4 y 14.9%, respectivamente). En ADP y DFL,  $P_7 \times P_1$  mostró heterosis promedio estadísticamente superior (H = 2.1%) o inferior (H = -2.5%), respectivamente. En DFL, la estimación de HB fue de -2.8% (tabla 12.5).

Los resultados anteriores, y otros que se pueden observar en la tabla 12.5, indican que hubo poca heterosis en la variable más importante, el peso promedio del fruto, debido a que las progenies de la mayoría de las cruzas no superaron a la media de sus padres o al mejor de ellos. Resultados similares se encontraron en híbridos de *Capsicum annuum* en el sur de Etiopía en número de frutos por planta y peso seco del fruto (Shumbulo et al., 2017). En estudios con *C. annuum*, Chakrabarty et al. (2019) mencionaron que sólo dos cruzas superaron en rendimiento al mejor progenitor; ellos atribuyeron esta limitante al poco distanciamiento genético que presentaron sus progenitores. A nivel genético, en la mayoría de las especies domesticadas, se ha reportado una reducción drástica de la diversidad genética con respecto a sus parientes silvestres; ésta se ha atribuido al efecto fundador durante el proceso de domesticación, en el que pocas plantas silvestres fueron elegidas progenitores de nuevas poblaciones cultivadas (Ladizinsky, 1998). Cruz y Souza (2003) mencionaron que cuando dos padres son distantes genéticamente, difieren en más *loci* heterocigotos y los efectos de dominancia son más evidentes y éstos contribuyen a la manifestación de mayor vigor híbrido.

En el presente estudio, debido a la cercanía de los progenitores no fue tan notorio el aumento en vigor. Estos resultados coinciden con los de Pérez et al. (2009) quienes mencionaron que para calidad de fruto pueden ser utilizadas las técnicas de selección, ya que solo tres de las 15 hibridaciones mostraron heterosis positiva donde se utilizó un progenitor proveniente de Perú, con un distanciamiento geográfico mayor al de los demás padres. En

Tabla 12.5. Heterosis (%) estimada con la media de los padres (H) o con el mejor de ellos (HB)

Cruza	DE		AP		ADP		DFL		NFL		DFR		PIF	
	H	HB	H	HB	H	HB	H	HB	H	HB	H	HB	H	HB
P10 x P3	6.7	-4.0	5.8	0.3	23.9**	22.3*	0.0	0.0	-18.2	-22.6	18.8**	0.9	-3.8	-3.8
P10 x P6	-8.4	-12.1*	27.6**	27.5**	13.2*	12.5*	-1.6	-1.8	66.9**	42.7**	-3.3	-3.8	-18.5**	-26**
P10 x P7	-19.1**	-22.9**	73.2**	68.4**	-8.5	-8.6	-14.4**	-14.5**	-0.8	-13.3	-17.7**	-18.5**	-24.5**	-25**
P10 x P8	-14.7**	-21.6**	57.5**	51.7**	-12.7*	-12.9*	-33.2**	-33.3**	-13.6	-21.9	-16.3**	-17.2**	-28.4**	-38**
P10 x P1	-12.4**	-18.9**	64.7**	55.8**	4.6	-4.0	-32.1**	-32.2**	-18.2	-23.3	-7.2	-16.9**	-25.7**	-31**
P3 x P6	-5.5	-11.7*	2.9	-2.3	10.6*	8.5	-0.5	-0.6	10.9	-0.4	15.2*	-1.9	-16.0*	-24**
P3 x P7	12.7*	5.9	-0.1	-2.8	12.8*	11.2	-0.5	-0.6	3.8	-4.6	15.7**	-1.9	-16.0*	-17*
P3 x P8	12.4*	9.6	3.1	-5.7	6.0	4.85	-1.2	-1.4	-2.9	-16.5	14.9*	-1.0	2.0	-12.5
P3 x P1	1.6	-1.6	21.7*	21.6	10.8	2.9	-1.2	-1.4	-2.9	-13.6	30.7**	23.9**	-15.6*	-21**
P6 x P7	-2.2	-2.9	16.5	13.5	4.7	4.1	-0.6	-0.6	40.8*	37.3	-2.3	-2.8	-7.9	-15.9
P6 x P8	-7.7	-11.7*	1.4	-2.4	5.2	4.3	-1.0	-1.4	11.8	-12.0	-2.4	-3.8	-8.7	-14.0
P6 x P1	3.8	0.0	21.3*	14.9	5.0	-4.1	-1.0	-1.4	17.8	-4.5	7.3	-4.3	2.3	-0.7
P7 x P8	-3.8	-7.46	6.3	-0.2	7.5	7.2	-0.3	-0.6*	-19.0	-35.1**	-0.9	-2.8	-13.9	-25**
P7 x P1	3.1	0.0	12.4	9.3	12.1*	2.8	-2.5*	-2.8*	7.2	-11.3	9.4	-2.8	-5.6	-11.2
P8 x P1	5.6	4.7	10.9	1.3	3.5	-4.8	-0.7	-0.7	-3.9	-7.5	0.2	-9.4	2.6	-6.0
SE	0.618	0.714	5.809	6.707	5.105	5.894	2.179	2.517	7.467	8.622	10.51	12.136	4.282	4.945

Fuente: Tesis doctoral de Imelda Martínez Estrada, 2020.

chile Manzano existe la tendencia a elegir plantas de menor porte para favorecer un mejor manejo agronómico, y sería deseable aplicar selección individual o utilizar progenitores con mayor divergencia para realizar hibridación, ya que esta especie fue introducida a México y su variabilidad genética se ha reducido debido a un posible efecto fundador en la especie, consecuente de una selección direccional (Pickersgill, 1969).

El hallazgo anterior contradice parcialmente la posición que se manifestó al estudiar la estructura genética de los tratamientos, y muestra que es poco viable la explotación de híbridos derivados de estas poblaciones. Estos resultados difieren de los publicados por Cervantes et al. (2016) quienes recomendaron usar híbridos para explotar su vigor híbrido. También se fortalece la hipótesis científica de que es más deseable y práctico aplicar alguna metodología de selección recurrente para acumular más genes aditivos, que permitan predecir confiablemente su comportamiento genético promedio en futuras combinaciones y su uso apropiado en la formación de nuevas poblaciones (González et al., 2007a y 2007b).

## Conclusiones

Los progenitores P8 y P1, mostraron la mejor ACG en la mayoría de las variables. Los progenitores P3 y P1 mostraron buena ACG en peso promedio del fruto, y ambos pueden aprovecharse como progenitores elite para el desarrollo de nuevos materiales sobresalientes de chile Manzano. Las cruzas P10 × P3, P10 × P7 y P10 × P8 son recomendables por su precocidad a emergencia de plántula, floración y fructificación. Los valores de heterosis positivos en la variable peso individual de fruto permitieron identificar a P3 × P8 y P8 × P1, como cruzas superiores que desde el punto de vista agronómico pudieran ser de importancia comercial.

## Referencias

- Aguilar, V. H., Corona, T., López, P., Latournerie, L., Ramírez, M., Villalón, H., y Aguilar, J. A. (2010). *Los chiles de México y su distribución*. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, ITConkal, UANL, UAN.
- Antonius, F., Kochhar, S., Jarret, L., y Syder, C. (2006). Antioxidants in hot pepper: variation among accessions. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*(41), 1237-1243. <https://doi.org/10.1080/03601230600857114>
- Borghi, B., y Baldi, V. (1970). Variabilità tra cloni di gerbera allevati (*Gerbera jamesonii*) in diverse condizioni ambientali. *Sementi elette*, 16(6), 25-32.
- Cedeño, J., Cedeño, G., Alcívar, J., Cargua, J., Cedeño, S., Cedeño, G., y Constante, T. (2018). Incremento del rendimiento y calidad nutricional del arroz con fertilización NPK complementada con micronutrientes. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 503-509. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.05>
- Cervantes, M. A. (2010). *Hibridaciones en plantas hortícolas; Mejora vegetal*. Escuela Familiar Agraria Campomar. [https://www.infoagro.com/hortalizas/hibridaciones\\_hortícolas.htm](https://www.infoagro.com/hortalizas/hibridaciones_hortícolas.htm)
- Cervantes, F., Hernández, J., Rangel, J. A., Andrio, E., Mendoza, E., Rodríguez, G., y Guevara, L. (2016). Aptitud combinatoria general y específica en la calidad de semilla de líneas S3 de maíz. *Revista de Fitotecnia Mexicana*, 39(3), 259-268. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v39n3/0187-7380-rfm-39-03-00259.pdf>
- Chakrabarty, I., Aminul, M., y Ahamed, T. (2019). Combining Ability and Heterosis for Yield and Related Traits in Chili (*Capsicum annuum* L.). *The Open Agriculture Journal*, 13, 34-43. <https://doi.org/10.2174/1874331501913010034>
- De Souza, A. and Maluf, R. (2003). Diallel analysis and estimation of genetic parameters of hot pepper (*Capsicum chinense* Jacq.). *Scientia Agricola*, 60, 105-113. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000100016>
- El-Badawy, E. M. (2013). Heterosis and combining ability in maize using diallel crossed among seven new inbred lines. *Asian Journal Crop Science*, 5, 1-13. <https://doi.org/10.3923/ajcs.2013.1.13>
- Falconer, S., y Mackay, F. C. (1996). *Introduction to Quantitative Genetics*. Logman Group Ltd. <https://vulms.vu.edu.pk/Courses/GEN733/Downloads/Introduction%20to%20Quantitative%20Genetic-DS%20Falconer.pdf>
- Fehr, W. R. (1987). *Principles of cultivar Development. Vol. I. Theory and Techniques*. MacMillan Publishing Company.
- González, H. A., Pérez L., D. J., Sahagún, C. J., Norman, M. T. H., Balbuena, M. A., y Gutiérrez, R. F. (2007a). Análisis de una cruda dialélica completa de líneas endogámicas de maíz. *Revista de Ciencias Agrícolas Informa*, 16, 10-17.
- González, H. A., Sahagún C. J., y Pérez L., D. J. (2007b). Estudio de ocho líneas de maíz en un experimento dialélico incompleto. *Revista de Ciencias Agrícolas Informa*, 16, 3-9.
- Guillen, C. P., Cruz, E., Castañón, G., Osorio, R., Brito, N. P., Lozano, A., y López, U. (2009).

- Aptitud combinatoria general y específica de germoplasma tropical de maíz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 101-107.
- Griffing, B. (1956). Concepts of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences* 9, 463-493. <https://www.publish.csiro.au/bi/pdf/BI9560463>
- Hasanuzzaman, M., Hakim, M. A., Hanafi, M. M., Shukor-Juraimi, A., Islam, M. M., y Shamsuddin, A. K. M. (2013). Study of heterosis in Bangladeshi Chilli (*Capsicum annum* L.) Landraces. *Agrociencia*, 47(7), 683-690. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S140531952013000700005&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140531952013000700005&lng=es&tlng=en)
- Jinks, L. (1954). The analysis of continuous variation in a diallel cross of *Nicotiana rustica* varieties. *Genetics*, 39, 767-788. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1209688/pdf/767.pdf>
- Ladizinsky, G. (1998). *Plant evolution under domestication*. Kluwer Academic Publishers. <https://www.springer.com/gp/book/9780412822100>
- Martínez, N., Méndez, I., Castañeda, H. M., Vera, A. M., Chávez, J. L., y Carrillo, J. C. (2014). Heterosis interpoblacional en agromorfología y capsicinoides de chile nativos de Oaxaca. *Revista de Fitotecnia Mexicana*, 37(3), 199-207. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802014000300004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802014000300004)
- Moll, H., Salhuana, S., y Robinson, F. (1962). Heterosis and genetic diversity in varieties of maize. *Crop Science*, 2, 197-198. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200030005x>
- Montes, S. (2010). *Recopilación y análisis de la información existente de las especies del género Capsicum que crecen y se cultivan en México*. Campo Experimental Bajío, INIFAP. [https://www.biodiversidad.gob.mx/genes/centrosOrigen/Capsicum/Informe\\_Final/Informe%20final%20Capsicum.pdf](https://www.biodiversidad.gob.mx/genes/centrosOrigen/Capsicum/Informe_Final/Informe%20final%20Capsicum.pdf)
- Rodríguez, N. M., Caca, G., García, J. L., y Urritea, A. (2015). Aclareo de frutos y aspersiones foliares de calcio y miel de abeja sobre la calidad de tomate tipo costilla. *Revista de Fitotecnia Mexicana*, 38(2), 197-204. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0187-73802015000200010&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0187-73802015000200010&lng=es&nrm=iso)
- Pérez, M., y Castro, R. (2008). *El Chile Manzano*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Pérez, M., González, V. A., Peña, A., y Sahagún, J. (2009). Combining ability and heterosis for fruit yield and quality in manzano hot pepper (*Capsicum pubescens* R & P) landraces. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(1), 103-109. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1027-152X2009000100015&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1027-152X2009000100015&script=sci_abstract&tlng=pt)
- Pickersgill, B. (1969). The domestication of chili peppers. En P. J. Ucko y G. W. Dimbley (Eds.), *The domestication and exploration of plants and animals* (pp. 443-450). Duckworth.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2013). *Chile manzano en invernadero*. <http://www.sicde.gob.mx/portal/bin/Nota.php?accion=buscar&notald=81263127451b69ce074cac>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (2019). *Relación de huertos de chile manzano Certificados para exportación del Estado de México a los es-*

- tados Unidos de América con tratamiento de Irradiación*. <https://www.gob.mx/sena-sica/documentos/huertos-de-chile-manzano-registrados-para-exportacion-a-los-estados-unidos-de-america?idiom=es>
- Seneviratne, G. S. and Kannangara, N. (2004). Heterosis, heterobeltiosis and commercial heterosis for agronomic traits and yield of Chilli (*Capsicum annum L.*). *Annals of the Sri Lanka Department Agriculture*, 6, 195-201.
- Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (2018). *Información de la producción agrícola nacional por entidad federativa de los años 1980 a 2018*. <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>.
- Shumbulo, A., Nigussie, M., y Alamerew, S. (2017). Study of heterosis and heterobeltiosis of pepper genotypes spicy (*Capsicum annum L.*) in southern Ethiopia. *International Journal of Plant Breeding and Genetics*, 11, 63-70. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v47n7/v47n7a5.pdf>
- Sprague, F., y Tatum, A. (1942). General vs specific combining ability in single-crosses of corn. *American Society of Agronomy*, 34, 923-932. <http://www.garfield.library.upenn.edu/classics1986/A1986E023900001.pdf>
- Vallejo, A. J., Mejía, C. J., García, V. R., y Ramírez, G. M. G. (2018). Respuesta de genotipos de *Capsicum pubescens* al daño ocasionado por el complejo fúngico de la marchitez. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 37, 50-70.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1809-3>
- Yan, W., y Hunt, L. A. (2002). Biplot analysis of diallel data. *Crop Science*, 42, 21-30. <https://doi.org/10.2135/cropci2002.0021>