



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENÉTICA

ADAPTACIÓN A CLIMA TEMPLADO DE POBLACIONES EXÓTICAS DE MAÍZ MEDIANTE SELECCIÓN MASAL VISUAL

ANA LUISA GÓMEZ ESPEJO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2014

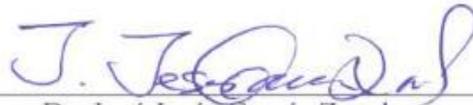
La presente tesis titulada: “ADAPTACIÓN A CLIMA TEMPLADO DE POBLACIONES EXÓTICAS DE MAÍZ MEDIANTE SELECCIÓN MASAL VISUAL” realizada por la alumna: ANA LUISA GÓMEZ ESPEJO bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado parcial de:

**MAESTRA EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

GENÉTICA

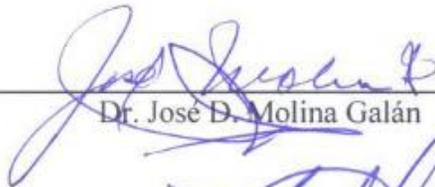
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



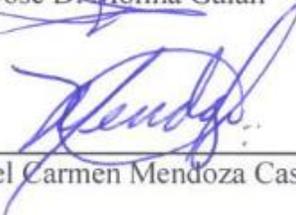
Dr. José Jesús García Zavala

**DIRECTOR DE
TESIS**



Dr. José D. Molina Galán

ASESOR



Dra. Ma. del Carmen Mendoza Castillo

ASESOR



Dr. Alfredo de la Rosa Loera

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Marzo de 2014

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo de México y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico para la realización de mi estudio de Postgrado.

*Al Colegio de Postgraduados, en especial al **PREGEP-Genética** por haberme brindado la oportunidad de realizar mi maestría en esta institución.*

A los integrantes del Consejo Particular:

*Al **Dr. J. Jesús García Zavala** por el apoyo incondicional y dirección del trabajo de investigación.*

*Al **Dr. José D. Molina Galán** por otorgar el germoplasma para la realización del presente trabajo, así como sus valiosas aportaciones en la redacción del mismo.*

*A la **Dra. Ma. del Carmen Mendoza Castillo** por su paciencia y aportaciones para mejorar la calidad del trabajo.*

*Al **Dr. Alfredo de la Rosa Loera** por su amistad incondicional, consejos y apoyo en la revisión de tesis.*

A los profesores e Investigadores del Postgrado:

Por su amistad, enseñanzas y consejos en mi formación profesional.

Dr. Amalio Santacruz, Dr. Víctor H. Aguilar, Dr. Tarsicio Corona, Dr. Ricardo Lobato, Dra. Micaela de la O, etc...

Al personal del Postgrado:

Por su apoyo y disposición en la realización de las actividades concernientes a mi preparación.

Srs. Carlos y Avelino, Sras. Dalila y Norma, Sr. Juan (Semillas)

A mis amigos y compañeros del Postgrado.

Los cuales hicieron muy grata y amena esta etapa de mi vida.

DEDICATORIAS

A mis padres, Salomón e Isaela.

A mis hermanos (as) y sobrinos (as).

A mis amigos y compañeros:

*Cesar, José Luis, Jesús, Javier, Lorena, Sandra,
Viri, Eddie, Cristian, Nery, Chío, Kike, Estelí, etc...*

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN GENERAL.....	1
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	3
LITERATURA CITADA	6
CAPÍTULO II.	9
POBLACIONES EXÓTICAS ORIGINALES Y ADAPTADAS DE MAÍZ. I: VARIEDADES LOCALES DE CLIMA TEMPLADO x VARIEDADES TROPICALES. 9	
2.1 RESUMEN.....	9
2.2 SUMMARY	10
2.3 INTRODUCCIÓN	11
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
2.5.2 Análisis por contrastes.....	20
2.5.3 Componentes del rendimiento	25
2.5.4 Heterosis de las cruzas.....	29
2.6 CONCLUSIONES	32
2.7 LITERATURA CITADA.....	33
CAPÍTULO III.....	35
POBLACIONES EXÓTICAS ORIGINALES Y ADAPTADAS DE MAÍZ. II: VARIEDAD TROPICAL Y TEMPLADA x VARIEDADES TROPICALES.....	35
3.1 RESUMEN.....	35
3.2 SUMMARY	36
3.3 INTRODUCCIÓN	37
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS	39
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
3.5.1 Análisis de varianza y Comparación de medias.....	42
3.5.2 Análisis por contrastes.....	48
3.5.3 Componentes del rendimiento	53
3.5.4 Heterosis de las cruzas.....	58

3.6 CONCLUSIONES	61
3.7 LITERATURA CITADA.....	62
IV. DISCUSIÓN GENERAL.....	65
4.1 Comportamiento de progenitores	65
4.1.1 Variedad Local de la raza Chalqueño.....	65
4.1.2 Variedad Exótica de la raza Tabloncillo.....	65
4.1.3 Variedad Exótica de la raza Tepecintle	66
4.1.4 Variedad Exótica de la raza Comiteco	66
4.1.5 Variedades Exóticas de la raza Tuxpeño.....	66
4.1.6 Variedad Exótica de la raza Cónico Norteño	67
4.1.7 Variedad Exótica de la raza Nal-tel.....	67
4.1.8 Variedad Exótica de la raza Zapalote Chico	67
4.2 Comportamiento de Cruzas.....	67
4.2.1 Cruzas de Chalqueño por Tabloncillo	68
4.2.2 Cruzas de Chalqueño por Tepecintle.....	68
4.2.3 Cruzas de Chalqueño por Comiteco	69
4.2.4 Cruzas de Tuxpeño	69
4.2.5 Cruzas de Cónico Norteño por Nal-tel	70
4.2.6 Cruzas de Cónico Norteño por Zapalote Chico.....	70
4.2.7 Cruzas Variedad Exótica Adaptada x Variedad Exótica Original.....	71
V. CONCLUSIÓN GENERAL.....	72

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Variedades de maíz utilizadas como progenitores de las cruzas representativas de cada región.....	13
Cuadro 2. Genealogía de las cruzas simples F ₁ evaluadas.....	14
Cuadro 3. Cuadrados medios del ANAVA combinado del rendimiento de grano (RTO), altura de planta (AP) y número de días a floración masculina (DFM) de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).....	17
Cuadro 4. Comparación de medias a través de ambientes de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).....	19
Cuadro 5. Contraste ortogonal de promedios a través de ambientes de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).....	20
Cuadro 6. Contraste ortogonal entre promedios de Progenitores vs Cruzas con la Variedad Local Original, a través de ambientes de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).....	22
Cuadro 7. Contraste ortogonal entre promedios de Progenitores vs Cruzas con la Variedad Local Mejorada, a través de ambientes de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).....	24
Cuadro 8. Contraste ortogonal entre promedios de Progenitores Exóticos vs Cruzas (VEA x VEO) a través de ambientes, de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).....	25
Cuadro 9. Correlaciones fenotípicas del rendimiento de grano con sus componentes y otras variables en promedio de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).....	26
Cuadro 10. Comparación de medias de los componentes del rendimiento y otras variables de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclo 2012).....	28
Cuadro 11.- Valores de Heterosis de cruzas intervarietales entre la variedad local y variedades exóticas (originales y adaptadas), promedio de progenitores y F ₁ para tres variables en dos ambientes de evaluación.	31
Cuadro 12. Variedades de maíz utilizadas como progenitores de las cruzas representativas de cada región.....	39
Cuadro 13. Genealogía de las cruzas simples F ₁ evaluadas.....	40

Cuadro 14. Cuadrados medios del ANAVA combinado del rendimiento de grano (RTO), altura de planta (AP) y número de días a floración masculina (DFM) de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).	44
Cuadro 15.- Comparación de medias a través de ambientes de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).	47
Cuadro 16.- Contraste ortogonal de promedios a través de ambientes de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).	48
Cuadro 17.- Contraste ortogonal de Progenitores <i>vs</i> Cruzas de variedades exóticas tropicales originales, a través de ambientes, de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).	50
Cuadro 18. Contraste ortogonal de Progenitores <i>vs</i> Cruzas de variedades exóticas tropicales adaptadas, a través de ambientes, de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).	52
Cuadro 19. Contraste ortogonal de Progenitores Exóticos <i>vs</i> Cruzas (VEA x VEO), a través de ambientes de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).	53
Cuadro 20. Correlaciones fenotípicas del rendimiento de grano con sus componentes y otras variables en promedio de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).	54
Cuadro 21. Comparación de medias de los componentes de rendimiento y otras variables de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclo 2012).	57

RESUMEN GENERAL

ADAPTACIÓN A CLIMA TEMPLADO DE POBLACIONES EXÓTICAS DE MAÍZ MEDIANTE SELECCIÓN MASAL VISUAL

ANA LUISA GÓMEZ ESPEJO, M.C.
COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2014

Independientemente de la eficiencia teórica de los métodos de mejoramiento, es la cantidad de variabilidad genética en las poblaciones la que determina el progreso genético obtenido por ciclo de selección; por ello, es de particular interés para todo programa de mejoramiento genético de maíz (*Zea mays* L.) incrementar la variabilidad genética de su germoplasma base, siendo para ello una vía la adaptación y uso de germoplasma exótico tropical o subtropical en las regiones de clima templado. En este trabajo se consideró la expresión del rendimiento de grano como indicador de la adaptación a clima templado, proponiéndose además que los genes de adaptación son dominantes sobre los de inadaptación. Así, durante los ciclos P-V 2011 y 2012, se evaluaron 48 poblaciones constituidas por 18 variedades progenitoras provenientes de distintas regiones climáticas, tanto en su versión original como en la seleccionada, y 30 de sus cruzas F₁. Las 30 cruzas se obtuvieron como sigue: 12 resultaron del apareamiento entre una variedad local de la raza Chalqueño en sus versiones original y seleccionada, con tres variedades exóticas originales y adaptadas de las razas tropicales Tabloncillo, Tepecintle y Comiteco; cuatro cruzas resultaron del apareamiento entre el compuesto exótico tropical Tuxpeño Crema 1 original y adaptado con la variedad V520C original y adaptada; ocho cruzas resultaron de aparear la variedad de la raza Cónico Norteño original y adaptada con las variedades exóticas originales y adaptadas de las razas Nal-tel y Zapalote Chico. Finalmente, seis cruzas provinieron de cruzar la versión original y la mejorada (adaptada) de cada variedad exótica. Los caracteres estudiados fueron rendimiento (RTO), altura de planta (AP), y días a floración masculina (DFM); de manera adicional se consideraron algunos componentes del rendimiento, como peso de 100 granos (PCG), volumen de 100 granos (VCG), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), número de hileras por mazorca (NHM), y número de granos por hilera (NGH). Se encontró que las poblaciones exóticas adaptadas superaron en RTO a sus respectivas versiones originales y que también fueron más precoces y más altas; es decir, el proceso de selección aumentó la frecuencia de genes favorables al rendimiento, y por ende aumentó también el grado de adaptación de las mismas. Las poblaciones que mostraron un mayor grado de adaptación fueron: Jalisco 63 (Tabloncillo), V520C (Tuxpeño), y Yucatán 7 (Nal-tel). El comportamiento de los cruzamientos y la mayoría de los contrastes ortogonales entre los promedios de rendimiento, permitieron evidenciar que las variedades exóticas adaptadas manifiestan su expresión genética de manera dominante cuando se cruzan con variedades exóticas originales o variedades locales en proceso de mejoramiento. Las cruzas de Cónico Norteño por Zapalote Chico, Chalqueño por Tepecintle, y Tuxpeño Crema 1 por V520C, manifestaron los valores más altos de heterosis (52, 32 y 28 %, en promedio), evidenciando posibles patrones heteróticos nuevos.

Palabras clave: *Zea mays* L., adaptación, selección masal, rendimiento, heterosis, cruzas, razas exóticas tropicales, razas de clima templado.

GENERAL SUMMARY

Regardless of the theoretical efficiency of the breeding methods, it is the amount of genetic variability in the populations which determines the maximum genetic progress obtainable by selection; for this reason, it is of particular interest to any maize (*Zea mays* L.) breeding program to increase the genetic variability of its basic germplasm, mainly through the adaptation and use of tropical and/or subtropical exotic germplasm in regions of temperate climate. In this study, we considered the grain yield as an indicator of the adaptation to temperate climate, and it was also proposed that the genes for adaptation are dominant over the genes that cause inadaptation. Thus, in 2011 and 2012 we evaluated 48 different populations constituted by 18 progenitor varieties from different climatic regions, both in their original and improved versions, and 30 of their F1 crosses. The 30 crosses, were made as follows: 12 were generated from the mating among one variety of the local Chalqueño race (in its original and improved versions) and three original exotic varieties and three selected (adapted) exotic varieties of the tropical races Tabloncillo, Tepecintle and Comiteco; four crosses resulted from the mating between the exotic variety Tuxpeño Crema 1 (original and adapted) and the exotic variety V520C (original and adapted); eight more crosses were generated by crossing a variety of the Cónico Norteño race (original and adapted) with the original and adapted exotic varieties of the races Nal-Tel and Zapalote Chico; finally, six crosses resulted from the mating between the original and the selected (adapted) exotic varieties of each race. The traits evaluated were yield (RTO), plant height (AP), and days to male flowering (DFM). Additionally, some yield components were considered as follows: weight (PCG) and volume (VCG) of 100 kernels, ear length (LM), ear diameter (DM), number of rows per ear (NHM), and number of kernels per row (NGH). Results showed that the exotic adapted populations generally surpassed the RTO of their original versions and were also earlier and taller. This means that the selection process increased the frequency of alleles favorable to yield and this also increased the degree of adaptation of the populations. The populations that had the highest degree of adaptation were Jalisco 63 (Tabloncillo), V520C (Tuxpeño) and Yucatán 7 (Nal-tel). In general, the performance of the crosses and the orthogonal contrasts between their yield averages revealed that the adapted exotic varieties had a dominant genetic expression over that one of the original exotic varieties and local varieties without much improvement. Moreover, crosses between Cónico Norteño and Zapalote Chico, Chalqueño and Tepecintle, and Tuxpeño Crema 1 and V520C showed the highest values of heterosis (52%, 32%, and 28% average), evidencing new heterotic patterns.

Key words: *Zea mays* L., adaptation, crosses, heterosis, yield, mass selection, tropical exotic races, temperate climate races.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos alimenticios más importantes del mundo, ya que constituye parte integral de la dieta y cultura de la mayoría de los pueblos latinoamericanos (Aramendiz *et al.*, 2005), en especial de México; además es considerado, una especie modelo de diversidad genética que ofrece grandes posibilidades de mejora genética, por su aporte de alelos que favorecen características como rendimiento, tolerancia a estrés biótico, resistencia a plagas y enfermedades, y alta calidad nutricional (Prasanna, 2012). Los alelos de los diferentes genes están dispersos en una amplia gama de razas y variedades.

La diversidad de los maíces nativos que se conocen en la actualidad son producto principalmente de la selección humana, la cual logró crear y mantener esta riqueza genética mediante sus conocimientos y habilidades (Muñoz, 2003; Márquez, 2008). Por otro lado, además de la intervención humana, también contribuyeron la diversidad de climas en los que se cultiva el maíz, los sistemas de producción, el intercambio de semillas, la multitud de usos, y el sistema de reproducción cruzada (Sánchez, 2011).

Con niveles de diversidad genética de los más altos en el mundo, México es considerado el centro de origen, domesticación y diversidad del maíz, consideración debida principalmente a factores tanto regionales como culturales y sociales en el país (Brush, 1998). En México se tienen documentadas 59 razas, ordenadas en cuatro grupos y algunos subgrupos, según estudios de caracteres morfológicos, iso-enzimáticos, y climáticos (Sánchez y Goodman 1992; Sánchez *et al.*, 2000; Ruiz *et al.*, 2008).

Según Sánchez (2011) la diversidad genética es la causa por la que una determinada especie es capaz de evolucionar en diferentes ambientes y bajo presión de selección; así mismo, el conocimiento de tal diversidad, es indispensable para la diversificación de las fuentes de germoplasma, ya que con ello se reducen riesgos de vulnerabilidad genética y, al mismo tiempo, se incrementan las probabilidades de detectar alelos favorables.

Desafortunadamente, la diversidad de los cultivos está siendo afectada por varios factores, entre los que destacan la urbanización acelerada, la erosión del hábitat, y el cambio climático (Prasanna, 2012; Walthall *et al.*, 2012), además del desarrollo agrícola basado en la siembra de grandes extensiones de tierra con híbridos comerciales (Louette *et al.*, 1997). La alternativa para menguar lo anterior es la ampliación de la base genética a través de metodologías eficientes para incorporar alelos que enriquezcan la expresión fenotípica de las variedades locales; esto se ha convertido en un objetivo primordial de los programas de mejoramiento genético, pues de la variación genética de las poblaciones depende el éxito en la obtención de variedades de alto rendimiento, adaptables a distintas condiciones ecológicas (Prasanna, 2012). Un germoplasma exótico se define como todo aquel cultivar no adaptado para su uso inmediato en condiciones ambientales dadas, el cual constituye un recurso importante en la mejora de las poblaciones, ya que representa una fuente de alelos que confieren productividad, resistencia a plagas y enfermedades, y resistencia a estreses abióticos (Goodman *et al.*, 2000; Holland, 2004; Zivanovic *et al.*, 2007).

Existen limitantes para la utilización inmediata del germoplasma exótico; tal es el caso de la falta de adaptación, manifestada por un bajo promedio de rendimiento en relación con el germoplasma local (Bridges and Gardner, 1987), acame de raíz y tallo (Bernardo, 2009), susceptibilidad a enfermedades, ciclo prolongado y arquetipo de planta indeseable (Cervantes y Castillo, 1985). Por ello, no es recomendable el uso del germoplasma exótico en forma *per se*, sino que se debe adaptar paulatinamente mediante bajas presiones de selección, y después combinarlo con el germoplasma local (Ponce *et al.*, 2002); lo anterior se basa en que la selección lenta permite separar gradualmente los complejos de genes útiles, de aquéllos que limitan la adaptación (Lonquist, 1974). Al respecto, la metodología de selección masal ha sido ampliamente documentada como un método efectivo para adaptar poblaciones de germoplasma exótico en áreas geográficas particulares, y así ampliar la variabilidad genética, principalmente en caracteres de herencia cuantitativa y así mejorar la respuesta a la selección (Albrech y Dudley, 1987; Vetelainen *et al.*, 1996; De Marchi y Biasutti, 1999; Ponce *et al.*, 2002; Pérez *et al.*, 2000 y 2002).

Con respecto a lo mencionado en el párrafo anterior, en zonas templadas se usan con éxito las razas indígenas antiguas, el germoplasma exótico tardío, y el germoplasma subtropical y tropical, como recursos potenciales para ampliar la base genética del germoplasma local (Wellhausen,

1956; Goodman, 1965; Rubino y Davis, 1990; Goodman y Carson, 2000; Simic *et al.*, 2003; Tarter *et al.*, 2004; Pérez *et al.*, 2007; Eno y Carena, 2008; Hallauer y Carena, 2013). En esta forma es posible aumentar las probabilidades de éxito, al combinar poblaciones de diverso origen (Goodman *et al.*, 2000; Mickelson *et al.*, 2001; Morello *et al.*, 2001).

Dada la importancia que representa conservar la diversidad genética en los programas de mejoramiento genético y debido a que el aprovechamiento de la variación genética en la obtención de variedades mejoradas e híbridos, se ha limitado al uso de germoplasma localmente adaptado (Pérez *et al.*, 2007), se ha propuesto y se ha logrado la adaptación a clima templado de variedades provenientes de clima tropical y subtropical, mediante selección masal visual estratificada, desarrollada por Molina en 1983 (Pérez *et al.*, 2000, 2002 y 2007).

Es en este contexto que el presente trabajo tiene como objetivos: a) Evaluar el efecto de la selección masal visual en la adaptación de poblaciones exóticas tropicales y subtropicales a clima templado; b) Evaluar el comportamiento de cruzas de variedades exóticas originales por sus versiones adaptadas y por variedades locales, para medir el grado de adaptación de la F₁ y sus progenitores al clima templado, con base en su rendimiento de grano y su comportamiento agronómico, c) Estimar el comportamiento heterótico de las cruzas entre las poblaciones evaluadas.

Se planteó la hipótesis de que las variedades exóticas adaptadas a clima templado tienen un mejor comportamiento agronómico que las variedades exóticas originales, y también que por efecto de la selección masal, se aumentó en ellas la frecuencia de alelos favorables de tipo dominante; estas variedades exóticas adaptadas al ser cruzadas con las variedades exóticas originales o con las locales sin selección, transmitirán y expresarán de manera dominante sus genes de adaptabilidad en la F₁, ya que se considera que los genes de inadaptación son recesivos.

LITERATURA CITADA

- Albrecht, B. and J. W. Dudley (1987)** Evaluation of four maize populations containing different proportions of exotic germplasm. *Crop Science*. 27: 480-486.
- Aramendiz T., H., Y. Arias, D. Castro, N. Marín y A. López (2005)** Caracterización morfológica de maíces criollos del Caribe colombiano. *Agronomía Colombiana*. 23(1): 28-34.
- Bernardo, R. (2009)** Genomewide selection for rapid introgression of exotic germplasm in maize. *Crop Science*. 49: 419-425.
- Bridges, W. C. and C. O. Gardner (1987)** Foundation populations for adapted by exotic crosses. *Crop Science*. 27: 501-506.
- Brush B. S. (1998)** Biocooperation and the benefits of crop genetic resources: The case of Mexican maize. *World Development*. 26(5): 755-766.
- Cervantes S., T. y F. Castillo G. (1985)** Comportamiento de cruces F₂ interraciales de maíz de México evaluadas en ambientes contrastados. *Revista Chapingo*. 47-49: 52-58.
- De Marchi, V. y C. A. Biasutti (1999)** Exotic germplasm introgression incidence on an adapted maize (*Zea mays* L.) population. *Agriscientia*. 16: 37-42.
- Eno C. O. and M. J. Carena (2008)** Adaptation of elite temperate and tropical maize populations to North Dakota. *Maydica*. 53: 217-226
- Goodman, M. M. (1965)** Estimates of genetic variance in adapted and exotic populations of maize. *Crop Science*. 5: 87-90.
- Goodman, M. M. and M. Carson L. (2000)** Reality vs. myth: Corn breeding, exotic, and genetic engineering. *Annual Corn and Sorghum Research Conference*. 55: 140-172.
- Goodman, M. M., J. Moreno, F. Castillo., R. N. Holley., M. L. Carson (2000)** Using tropical maize germplasm for temperate breeding. *Maydica*. 45: 221-234.
- Hallauer, A. R. and M. J. Carena (2013)** Adaptation of tropical maize germplasm to temperate environments. *Euphytica*. 1-11.
- Holland, J. B. (2004)** Breeding: Incorporation of exotic germplasm. In *Encyclopedia of Plant and Crop Science*. Marcel Dekker Eds. pp: 222-224.
- Lonnquist, J. H. (1974)** Consideration and experiences with recombinations of exotic and corn belt maize germplasm. In: *Proceedings 29th Annual Corn and Sorghum industry Research Conference*. Chicago American Seed Assotiation. Washintong D.C. p. 102-117.
- Louette D., A. Charrier and J. Berthaud (1997)** In situ conservation of maize in México: Genetic diversity and maize seed management in a traditional community. *Economic Botany*. 51(1): 20-38.

- Márquez S., F. (2008)** De las variedades criollas de maíz (*Zea mays* L.) a los híbridos transgénicos. I: Recolección de germoplasma y variedades mejoradas. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. 5(2): 151-166
- Mickelson, H. R., H. Cordova, K. V. Pixley and M. S. Bjarnason (2001)** Heterotic relationships among nine temperate and subtropical maize populations. *Crop Science*. 41: 1012–1020.
- Morello, C. de L., J. B. de Miranda F. y E. P. Gorgulho (2001)** Partial diallel cross between exotic and adapted maize populations evaluated in acid soil. *Scientia Agrícola*. 58(2): 313-319.
- Molina G., J. D. (1983)** Selección masal visual estratificada en maíz. Folleto Técnico. Centro de Genética. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 36 p.
- Muñoz O., A. (2003)** Centli-maíz. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. México. 210 p.
- Pérez C., A. A., J. D. Molina G. y A. Martínez G. (2000)** Adaptación a clima templado de una variedad de maíz tropical mediante selección masal visual estratificada. *Agrociencia*. 34: 533-542.
- Pérez C., A. A., J. D. Molina G. y A. Martínez G. (2002)** Adaptación a clima templado de razas tropicales y subtropicales de maíz de México por selección masal visual. Rendimiento, altura de planta y precocidad. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 25(4): 435-441.
- Pérez C., A. A., J. D. Molina G., A. Martínez G., P. García M. y D. Reyes L. (2007)** Selección masal para la adaptación a clima templado de razas tropicales y sub-tropicales de maíz de México. *Bioagro*. 19(3): 133-141.
- Ponce A., D. D., J.D. Molina G., J. A. Mejía C., T. Cervantes S., y J. J. López R. (2002)** Comportamiento de variedades de maíz de razas exóticas originales y adaptadas y de sus cruzas con variedades de razas locales. *Nota Científica*. XIX Congreso Nacional de Fitogenética. Pag. 133.
- Prasanna, B. M. (2012)** Diversity in global maize germplasm: Characterization and utilization. *Journal Biosciences*. 37: 843–855.
- Rubino D. B. and D. W. Davis (1990)** Response of a sweet corn x tropical maize composite to mass selection for temperate zone adaptation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 115(5): 848-853.
- Ruiz C., J. A., N. Durán P., J. J. Sánchez G., J. Ron P., D. R. González E., G. Medina G., J. Holland (2008)** Climatic adaptation and ecological descriptors of 42 maize races. *Crop Science*. 48(4): 1502-1512.
- Sánchez G., J. J. (2011)** Diversidad del Maíz y el Teocintle. Informe preparado para el proyecto: “Recopilación, generación, actualización y análisis de información acerca de la diversidad genética de maíces y sus parientes silvestres en México”. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Manuscrito 2.

- Sánchez G., J. J. and M. M. Goodman (1992)** Relationships among the Mexican races of maize. *Economic Botany*. 46: 72-85.
- Sánchez G., J. J., M. M. Goodman and C. W. Stuber (2000)** Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of México. *Economic Botany*. 54: 43-59.
- Simic, D., T. Presterl, G. Seitz, and H. H. Geiger (2003)** Comparing methods for integrating exotic germplasm into European forage maize breeding programs. *Crop Science*. 43: 1952–1959.
- Tarter, J. A., Goodman M. M., and Holland J. B. (2004)** Recovery of exotic alleles in semiexotic maize inbreds derived from crosses between Latin American accessions and a temperate line. *Theoretical and Applied Genetics*. 109: 609–617
- Vetelainen M., E. Nissila, P. M. A. Tigerstedt and R. von Bothmer (1996)** Utilization of exotic germplasm in Nordic barley breeding and its consequences for adaptation. *Euphytica*. 92: 267-273.
- Walthall, C. L., J. Hatfield, P. Backlund, L. Lengnick, E. Marshall, M. Walsh, S. Adkins, M. Aillery, E. A. Ainsworth, C. Ammann, C. J. Anderson, I. Bartomeus, L. H. Baumgard, F. Booker, B. Bradley, D. M. Blumenthal, J. Bunce, K. Burkey, S. M. Dabney, J. A. Delgado, J. Dukes, A. Funk, K. Garrett, M. Glenn, D. A. Grantz, D. Goodrich, S. Hu, R. C. Izaurrealde, R. A. C. Jones, S-H. Kim, A. D. B. Leaky, K. Lewers, T. L. Mader, A. McClung, J. Morgan, D. J. Muth, M. Nearing, D. M. Oosterhuis, D. Ort., C. Parmesan, W. T. Pettigrew, W. Polley, R. Rader, C. Rice, M. Rivington, E. Rosskopf, W. A. Salas, L. E. Sollenberger, R. Srygley, C. Stockle, E. S. Takle, D. Timlin, J. W. White, R. Winfree, L. Wright-Morton, L. H. Ziska (2012)** Climate Change and Agriculture in the United States: Effects and Adaptation. USDA Technical Bulletin 1935. Washington, DC. 186 pages.
- Wellhausen, E. J. (1956)** Improving American corn with exotic germplasm. In: Proceedings of the annual hybrid corn industry research conference. 11: 85–96.
- Zivanovic T., R. Dordevic, S. Drazic, M. Secanski and M. Kostic (2007)** Effects of recombinations on variability and heritability of traits in maize populations with exotic germplasm. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*. 21(2): 229-234.

CAPÍTULO II.

POBLACIONES EXÓTICAS ORIGINALES Y ADAPTADAS DE MAÍZ. I: VARIEDADES LOCALES DE CLIMA TEMPLADO x VARIEDADES TROPICALES

ORIGINAL AND ADAPTED EXOTIC POPULATIONS OF MAIZE. I: LOCAL VARIETIES OF TEMPERATE CLIMATE x TROPICAL VARIETIES

Ana Luisa Gómez -Espejo^{1*}, José D. Molina-Galán¹, J. Jesús García-Zavala¹, Ma. del Carmen Mendoza-Castillo¹, Alfredo de la Rosa-Loera.²

¹Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Colegio de Postgraduados, Km. 36.5 Carretera México-Texcoco, C.P. 56230, Montecillo, Texcoco, México. gomez.ana@colpos.mx

²Departamento de Fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, 25315, Saltillo, Coahuila.

2.1 RESUMEN

En México, son pocos los programas de mejoramiento genético de maíz (*Zea mays* L.) que han incorporado germoplasma exótico adaptado para ampliar la base genética de sus materiales, a fin de incorporarles genes nuevos favorables. En este trabajo se consideró al rendimiento de grano de los materiales evaluados, como indicador del grado de adaptación a clima templado. Se propuso que los genes de adaptación son dominantes sobre los de inadaptación. Así, se evaluaron ocho progenitores y 15 de sus cruzas F₁. De las cruzas, 12 resultaron del apareamiento entre una variedad local de la raza Chalqueño (en versión original y mejorada) y tres variedades exóticas originales y tres seleccionadas (adaptadas) de las razas Tabloncillo, Tepecintle y Comiteco, y tres cruzas provenientes del apareamiento entre la versión original y la seleccionada (adaptada) de cada raza exótica. Las cruzas fueron de los tipos variedad local original por variedad exótica original y adaptada; variedad local mejorada por variedad exótica original y adaptada, y variedad exótica adaptada por su versión original. Los caracteres estudiados fueron: rendimiento (RTO), altura de planta (AP) y días a floración masculina (DFM). Los resultados indicaron que las poblaciones exóticas adaptadas superaron en RTO a sus respectivas versiones originales, y que también fueron más precoces y más altas. La mayoría de los contrastes entre los promedios de RTO de las cruzas resultaron significativos y presentaron valores en favor de las poblaciones exóticas adaptadas, lo que evidenció que en las cruzas F₁ los genes de los progenitores adaptados dominaron sobre los genes de progenitores originales inadaptados. Las cruzas de las variedades de la raza Chalqueño con las de la raza Tepecintle manifestaron los valores más altos de heterosis (32 % en promedio), evidenciando un nuevo patrón heterótico.

Palabras clave: *Zea mays* L., adaptación, germoplasma tropical, heterosis, razas exóticas, rendimiento, selección masal, variedad local.

2.2 SUMMARY

In Mexico, few maize (*Zea mays* L.) breeding programs have incorporated adapted exotic germplasm to increase the genetic base of their materials by incorporating new favorable genes. In this paper we considered the grain yield of the materials evaluated as an indicator of their adaptation to temperate climate, and it was also proposed that the genes for adaptation are dominant on that ones causing inadaptation. Thus, eight progenitors and 15 of their F₁ crosses were evaluated. From the 15 crosses, 12 were generated from the mating among one variety of the local Chalqueño race (in original and improved versions) and three original exotic varieties and three selected (adapted) exotic varieties of the races Tabloncillo, Tepecintle and Comiteco, and three crosses resulted from the mating among the original and the selected (adapted) exotic races. Thus, the crosses evaluated were of the types: original local variety by original and adapted exotic varieties, improved local variety by original and adapted exotic varieties, and adapted exotic variety by its original version. Yield (RTO), plant height (AP) and days to male flowering (DFM) were the traits studied. Results indicated that the adapted exotic populations generally surpassed the RTO of their original versions and were also earlier and taller. Most of the contrasts of the averages of RTO among the crosses were significant and had values in favor of the adapted exotic populations; this result is an indicator of the validity of the assumption, which states that in the F₁ crosses the genes of the adapted progenitor were dominant over the genes of the original progenitor. Moreover, crosses between varieties of Chalqueño with Tepecintle varieties showed higher values of heterosis (32% average), evidencing a new heterotic pattern.

Key words: *Zea mays* L., adaptation, exotic races, heterosis, local variety, mass selection, tropical germplasm.

2.3 INTRODUCCIÓN

En México existe gran diversidad genética del maíz (*Zea mays* L.) y por tanto, un amplio reservorio de genes importantes para la evolución, conservación y mejoramiento de la especie. La utilización de este reservorio en el mejoramiento genético es aún reducida, debido quizá al rendimiento bajo que algunas variedades presentan y a la alta inversión en tiempo y recursos que implica mejorarlas. En consecuencia, los programas de mejoramiento genético comúnmente utilizan sólo una parte de la diversidad genética disponible, por lo que para formar nuevas variedades mejoradas y ampliar la base genética en una zona determinada, los fitomejoradores necesitan recurrir a la introducción y adaptación paulatina de germoplasma exótico.

El germoplasma exótico es todo material genético disponible en otras regiones que se introduce a una zona determinada (De la Cruz *et al.*, 2003); y la adaptación de materiales exóticos a una nueva región, es importante para garantizar avances genéticos en el futuro. Al respecto, se ha usado germoplasma de maíz exótico en el mejoramiento del maíz de climas templados (Goodman, 1985; Beck *et al.*, 1991; Goodman y Carson, 2000). En estos casos, el maíz exótico al sembrarlo en la nueva región presenta problemas de adaptación, tales como susceptibilidad a enfermedades, modificación del ciclo vegetativo y bajo rendimiento, por lo que no debe utilizarse *per se* (Navas y Cervantes, 1991). Entonces, la mejor opción para aumentar la frecuencia de los genes favorables y adaptar el material exótico, antes de ser cruzado con el local, es aplicar una ligera presión de selección a largo plazo.

La selección masal es eficaz para adaptar poblaciones exóticas a áreas específicas, mediante el mejoramiento de caracteres como rendimiento de grano y sus componentes. Tal es el caso de poblaciones de maíz del trópico y subtrópico húmedo de México adaptadas mediante selección masal visual a condiciones de clima templado (Molina, 1983; Pérez *et al.*, 2007).

El germoplasma exótico constituye un recurso muy valioso, debido a que se han identificado patrones heteróticos para rendimiento de grano en cruzamientos de germoplasma exótico por germoplasma local adaptado en áreas tropicales y subtropicales (De la Cruz *et al.*, 2003). No obstante, existe poca información sobre la heterosis en maíz de origen templado por germoplasma

tropical (Gaytán y Mayek, 2010), y también ésta es escasa con respecto a la medición del grado de adaptación de materiales exóticos tropicales seleccionados por su rendimiento en Valles Altos, aunque existen algunas variedades mexicanas tropicales y subtropicales de maíz que han sido adaptadas a clima templado, las cuales mediante selección masal adquirieron características agronómicas sobresalientes en aspecto de planta y mazorca, rendimiento, sanidad, días a floración masculina, y altura de la planta (Pérez *et al.*, 2000 y 2002).

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar poblaciones progenitoras y un conjunto de cruza de maíz de variedades exóticas originales con sus versiones adaptadas y con variedades locales, esto para medir el grado de adaptación a clima templado de las poblaciones y sus cruza. El rendimiento de grano y el comportamiento agronómico fue el criterio de evaluación de la adaptación; adicionalmente se evaluó la heterosis de las cruza entre las poblaciones empleadas. Se planteó la hipótesis de que los genes de inadaptación son recesivos y que las variedades exóticas adaptadas por selección tienen una alta frecuencia de alelos favorables de tipo dominante; estas variedades exóticas adaptadas al cruzarse con un material contrastante desadaptado o local, transmiten y expresan de manera dominante sus genes de adaptabilidad en la F₁.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluaron ocho variedades progenitoras de maíz representativas de cuatro de las 25 razas descritas por Wellhausen *et al.* (1951) y 15 de sus cruzas simples. Las variedades provinieron de tres regiones climáticas: trópico húmedo, subtropical y templado (Cuadro 1).

Cuadro 1. Variedades de maíz utilizadas como progenitores de las cruzas representativas de cada región.

	Raza	Variedad	Altitud (m)	Región de origen	Clave
1	Chalqueño	C. Univ. (Orig.)	2050	Templado	VLO
2	Chalqueño	C. Univ. (SMVE12)	2050	Templado	VLM
3	Tabloncillo	Jal. 63 (Orig.)	0-1500	Subtrópico	VEO-1
4	Tabloncillo	Jal. 63 (SMV17)	0-1500	Subtrópico	VEA-1
5	Tepecintle	Chis. 76 (Orig.)	100-600	Trópico húmedo	VEO-2
6	Tepecintle	Chis. 76 (SMV17)	100-600	Trópico húmedo	VEA-2
7	Comiteco	Chis. 39 (Orig.)	1100-1500	Trópico húmedo	VEO-3
8	Comiteco	Chis. 39 (SMV17)	1100-1500	Trópico húmedo	VEA-3

VLO= Variedad local original; VLM= Variedad local mejorada; VEO= Variedad exótica original; VEA= Variedad exótica adaptada; SMV=Ciclos de selección masal visual y SMVE=Ciclos de selección masal visual estratificada.

La selección para adaptación de las variedades exóticas originales (VEO) se inició en el ciclo primavera-verano (P-V) de 1989 en Montecillo, Edo. de México, su ubicación geográfica corresponde a las coordenadas 19° 27' 37.02" N y 98° 54' 24.02" O, y a 2247 m de altitud. El clima del lugar es del tipo C (Wo) (w)b(1)g que corresponde al templado subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura media anual de 15 °C y una precipitación media anual de 750 mm, con una oscilación térmica de 5 a 7 °C (García, 1981).

A cada población se aplicó selección masal visual basada en el aspecto de planta y mazorca. La selección en cada variedad se realizó en una parcela de 15 surcos de 10 m separados a 80 cm y 30 cm entre plantas. Se realizaron polinizaciones fraternales con mezcla de polen entre las mejores plantas de cada parcela de 510 plantas por variedad. La cosecha fue manual y se seleccionaron las mejores 200 mazorcas (39.2%) para formar un compuesto balanceado con igual número de semillas de cada mazorca. Este proceso se repitió por varios años hasta obtener 12 ciclos de selección masal visual estratificada (SMVE12) en la variedad local (VLM); 17 ciclos de selección

masal visual recurrente (SMV17) en las razas exóticas; a los compuestos balanceados SMV17 se les denominó variedades exóticas adaptadas (VEA).

En el ciclo primavera-verano (P-V) 2010, en Montecillo, Edo. de México, se formaron cruzas de los tipos: a) variedad local original por variedad exótica original y adaptada; b) variedad local mejorada por variedad exótica original y adaptada; y c) variedad exótica adaptada por su versión original (Cuadro 2).

Cuadro 2. Genealogía de las cruzas simples F₁ evaluadas.

Núm.	Genealogía de las cruzas	Clave
1	C. Univ. (Orig.) x Jal. 63 (Orig.)	VLO x VEO-1
2	C. Univ. (Orig.) x Jal. 63 (SMV17)	VLO x VEA-1
3	C. Univ. (Orig.) x Chis. 76 (Orig.)	VLO x VEO-2
4	C. Univ. (Orig.) x Chis. 76 (SMV17)	VLO x VEA-2
5	C. Univ. (Orig.) x Chis. 39 (Orig.)	VLO x VEO-1
6	C. Univ. (Orig.) x Chis. 39 (SMV17)	VLO x VEA-2
7	C. Univ. (SMVE12) x Jal. 63 (Orig.)	VLM x VEO-1
8	C. Univ. (SMVE12) x Jal. 63 (SMV17)	VLM x VEA-1
9	C. Univ. (SMVE12) x Chis. 76 (Orig.)	VLM x VEO-2
10	C. Univ. (SMVE12) x Chis. 76 (SMV17)	VLM x VEA-2
11	C. Univ. (SMVE12) x Chis. 39 (Orig.)	VLM x VEO-3
12	C. Univ. (SMVE12) x Chis. 39 (SMV17)	VLM x VEA-3
13	Jal.63 (SMV17) x Jal. 63 (Orig.)	VEA-1 x VEO-1
14	Chis. 76 (SMV17) x Chis. 76 (Orig.)	VEA-2 x VEO-2
15	Chis. 39 (SMV17) x Chis. 39 (Orig.)	VEA-3 x VEO-3

VLO= Variedad local original; VLM= Variedad local mejorada; VEO= Variedad exótica original; VEA= Variedad exótica adaptada.

Las 15 cruzas, más las ocho variedades progenitoras, se evaluaron en Montecillo, Edo. de México, en dos ciclos agrícolas (P-V 2011 y P-V 2012). La parcela experimental consistió de dos surcos de 6 m separados a 80 cm; en cada surco hubo 16 matas de dos plantas separadas cada 40 cm, dando una densidad de población de 66,600 plantas por hectárea. Se usó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La siembra fue manual, depositándose tres semillas por sitio para aclarar a dos plantas por mata, se aplicó un riego de germinación y demás riegos de auxilio hasta el establecimiento de las lluvias. Se fertilizó con 120 kg N y 80 kg P₂O₅ ha⁻¹; todo el P₂O₅ y la mitad del N se aplicó a la siembra, y el resto en la segunda

escarda (30 días después de la siembra, dds). Se hicieron 2 pasos de cultivo, el primero 15-20 días después de la germinación y el segundo a los 30 días. La maleza se controló con el herbicida Gesaprim Calibre 90 GDA®, aplicado 7 dds en una dosis de 3 L ha⁻¹.

Se registraron los siguientes caracteres: rendimiento de mazorca a humedad constante por hectárea (RTO, t ha⁻¹), días a floración masculina (DFM), altura de la planta (AP, cm), altura de la mazorca (AM, cm), peso de 100 granos (PCG, g), volumen de 100 granos (VCG, ml), longitud de mazorca (LM, cm), diámetro de mazorca (DM, cm), número de hileras por mazorca (NHM), número de granos por hilera (NGH), e índice de posición de mazorca (IPM). Con excepción de RTO, DFM y APM, los demás caracteres fueron medidos en un solo ciclo (P-V 2012), debido a daños por heladas en el primer ciclo (P-V 2011) que dificultaron las mediciones de componentes, ya que las mazorcas resultaron afectadas con granos vanos, tomando una muestra aleatoria de 10 plantas o 10 mazorcas en cada parcela y se registró el promedio por planta o por mazorca. El carácter DFM se registró como el número de días transcurridos desde el primer riego de germinación hasta que la mitad de las plantas en cada parcela se encontraban en antesis. El IPM se obtuvo mediante la relación altura de mazorca/altura de planta.

A los datos de obtenidos se les aplicó un análisis de varianza (ANAVA) combinando los dos ambientes, mediante el paquete estadístico SAS 9.1 (SAS, 2003). Los promedios de las variables se compararon con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Las fuentes de variación fueron Ambientes, Repeticiones/Ambientes, Poblaciones, Poblaciones x Ambientes, y Error. La suma de cuadrados de Poblaciones se partió en Progenitores originales (PO), Progenitores mejorados o adaptados (PM), cruzas de variedad local original por variedades exóticas (VLO x VE), cruzas de variedad local mejorada por variedades exóticas (VLM x VE), cruzas de Progenitores mejorados por Progenitores originales (PM x PO) y grupos de poblaciones.

Para cada carácter se calcularon las correlaciones fenotípicas de Pearson utilizando el procedimiento PROC CORR del programa SAS. La heterosis de las cruzas interraciales se estimó con respecto al progenitor medio (H_{PM}) y también con respecto al progenitor superior (H_{PS}). Finalmente, se efectuaron contrastes ortogonales entre grupos de cruzas para evaluar las bondades del germoplasma exótico mejorado con respecto al mismo tipo de germoplasma original.

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1 Análisis de varianza y Prueba de medias

Ambientes. Con base en el ANAVA de las cruzas de la variedad local (Compuesto Universal) con las variedades exóticas originales y exóticas adaptadas (Cuadro 3), se detectaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre Ambientes en las variables RTO, AP y DFM, lo que puede atribuirse a que las condiciones climáticas variaron de un ciclo a otro; destacando heladas tempranas y sequías prolongadas durante el ciclo P-V 2011, las cuales afectaron la expresión de los genotipos.

Poblaciones. Se detectaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre poblaciones para las tres variables, lo que indica que los materiales experimentales tuvieron diferente expresión genotípica y fenotípica; lo anterior se debió tal vez a que se analizaron en conjunto progenitores y cruzas de diferente origen geográfico y racial, con niveles desiguales de mejoramiento genético y de adaptación. La partición de esta fuente de variación confirmó diferencias significativas entre los tipos de poblaciones en diversas características agronómicas. Se detectaron diferencias ($P \leq 0.01$) entre poblaciones originales en las tres variables; entre poblaciones mejoradas hubo diferencias sólo para AP; entre las cruzas VLO x VE las hubo para RTO y DFM; y para las interacciones VLM x VE y PM x PO las hubo para AP y DFM (Cuadro 3). Los resultados anteriores evidencian un comportamiento *per se* diferente entre poblaciones locales y exóticas, además de un efecto diferente de la selección para rendimiento de grano (grado de adaptación) entre las variedades exóticas originales (no seleccionadas) y exóticas adaptadas (seleccionadas).

Poblaciones x Ambientes. Esta interacción resultó altamente significativa ($P \leq 0.01$) en RTO y AP, mientras que en la partición, la interacción de PO x Ambientes presentó significancia en las tres variables (Cuadro 3). Las tres últimas particiones sólo mostraron significancia en DFM y RTO. Los resultados indican que en general, los materiales mejorados interaccionaron poco con los ambientes; esto debido tal vez a una mayor frecuencia de genes favorables para adaptación en general, aunque el rendimiento resultó ser la variable más afectada por los efectos adversos del clima y daños de plagas y enfermedades.

Los coeficientes de variación resultaron de baja magnitud para los tres caracteres, por lo que la confiabilidad de los datos es aceptable, aunque en rendimiento, el CV alcanzó un valor de 21 %, común en experimentos de campo similares al presente.

Cuadro 3. Cuadrados medios del ANAVA combinado del rendimiento de grano (RTO), altura de planta (AP) y número de días a floración masculina (DFM) de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).

F.V.	G.L.	RTO	AP	DFM
Ambientes	1	25.31**	19208.04**	3460.01**
Repeticiones (ambientes)	4	74.72**	1074.49*	19.60
Poblaciones	22	209.78**	4483.13**	328.82**
PO	3	13.54**	9095.29**	534.50**
PM	3	8.36	4413.05**	113.15
VLO x VE	5	12.11**	400.66	153.44**
VLM x VE	5	19.78	496.81*	141.80**
PM x PO	2	13.83	6192.46**	945.50**
Grupos de Poblaciones	4	24.57**	10307.87**	480.95**
Poblaciones x Ambientes	22	120.63**	522.04*	26.92
PO x Ambientes	3	9.98**	1994.67**	3.61**
PM x Ambientes	3	4.66	61.14	59.15
(VLO x VE) x Ambientes	5	5.71	293.06	28.71
(VLM x VE) x Ambientes	5	8.58	114.90	7.58**
(PM x PO) x Ambientes	2	0.47	325.83	28.39**
Grupos de Poblaciones x Ambientes	4	15.47**	656.47	41.41
Error experimental	88	125.30	311.30	22.43
Total	137			
CV (%)		21	6	5

*,** Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad. RTO (t ha⁻¹), AP (cm); DFM (días); PO= Progenitores Originales; PM= Progenitores Mejorados; VLO= Variedad Local Original; VE= Variedades exóticas.

Progenitores. Las variedades progenitoras con mayor RTO fueron: Compuesto Universal Mejorado, Jalisco 63 Adaptada y Compuesto Universal Original (6.6, 6.3, y 5.9 t ha⁻¹, respectivamente). Las variedades locales fueron las que presentaron los valores promedio de AP superiores (301 cm) y aceptable precocidad (97.7 y 98.2 días, respectivamente) (Cuadro 4). Por otro lado, la variedad Jalisco 63 Adaptada fue la de más bajo porte (238 cm) y más precoz (91 d). Por el contrario, las variedades más tardías fueron Chiapas 39 Original y Jalisco 63 Original (115.2

y 114.7 días, respectivamente). Sin embargo, la versión mejorada de cada variedad, disminuyó su periodo de DFM, por lo que pueden catalogarse como intermedias, de acuerdo con la clasificación propuesta por Pérez *et al.* (2007) con 108 a 90 días de ocurrida la antesis.

Al comparar las VEO con sus versiones adaptadas (VEA), se observaron cambios favorables en estas últimas, ya que presentaron mayor rendimiento y mayor precocidad; por el contrario, en altura de planta, sólo la variedad Jalisco 63 Adaptado disminuyó su porte, misma que podría considerarse como la más adaptada, por su comportamiento positivo con respecto a la variedad original. Pero esto no concuerda con lo observado por Pérez *et al.* (2007), quienes en su estudio consideran a la variedad de la raza Tabloncillo como la menos adaptada, a Comiteco como la más adaptada y a Tepecintle con adaptación intermedia. No obstante, estos resultados indican que la selección masal visual es un método efectivo para adaptar variedades exóticas, donde los indicadores de la adaptación son: aumento progresivo del rendimiento, mayor sanidad de planta, y reducción del ciclo vegetativo, coincidiendo con Pérez *et al.* (2002) quienes consideran que la selección masal visual incrementa la frecuencia de alelos favorables en loci que favorecen el rendimiento. Por otro lado, entre la variedad local original y su versión mejorada, sólo existieron diferencias en RTO; característica típica de programas de selección masal practicada en poblaciones adaptadas o mejoradas, donde las ganancias en el proceso de selección fueron relativamente bajas (Pérez *et al.*, 2002).

Cruzas. El rendimiento de las mejores cruzas osciló entre 6.6 y 7.3 t ha⁻¹, siendo éstas: C. Univ. Orig. x Chis. 39 Adapt., C. Univ. Mej. x Chis. 39 Adapt., Chis. 39 Adapt. x Chis. 39 Orig., C. Univ. Mej. x Chis. 76 Adapt. y C. Univ. Orig. x Jal. 63 Adapt.; no hubo diferencias significativas entre las cruzas y en todas ellas participaron las variedades exóticas adaptadas. De aquí se deduce que las variedades exóticas adaptadas contribuyeron con genes dominantes favorables de adaptación en las F₁, más los posibles efectos epistáticos entre los genes de progenitores genéticamente contrastantes.

Las variables AP y DFM de las cruzas Jal. 63 Adapt. x Jal. 63 Orig. y Chis. 76 Adapt. x Chis. 76 Orig., presentaron los portes de planta más bajos (252 cm en promedio), mientras que las más precoces fueron: Jal. 63 Adapt. x Jal. 63 Orig., C. Univ. Mej. x Jal. 63 Adapt., y C. Univ. Orig. x

Jal. 63 Adapt., la floración media fue de 88.2 días. Estos resultados indican que hubo interacciones positivas en cruzas de poblaciones exóticas con poblaciones locales para algunas características agronómicas y fenológicas. Estas interacciones podrían ser útiles en el mejoramiento genético del maíz, mediante la creación de cruzas agronómicamente competitivas con los híbridos comerciales (Holland, 2004).

Cuadro 4. Comparación de medias a través de ambientes de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).

TRATAMIENTOS	RTO (t ha ⁻¹)	AP (cm)	DFM (días)
Progenitores			
C. Univ. Original (Chalqueño)	5.9 abc	301 ab	98.2 cdef
C. Univ. Mejorado (Chalqueño)	6.6 ab	301 ab	97.7 cdef
Jalisco 63 Original (Tabloncillo)	3.8 cd	297 abc	114.7 a
Jalisco 63 Adaptado (Tabloncillo)	6.3 abc	238 fg	91.0 efg
Chiapas 76 Original (Tepecintle)	2.2 d	217 g	99.0 cde
Chiapas 76 Adaptado (Tepecintle)	4.0 bcd	262 cdef	98.2 cdef
Chiapas 39 Original (Comiteco)	4.0 bcd	274 bcdef	115.2 a
Chiapas 39 Adaptado (Comiteco)	4.9 abc	283 abcde	101.3 bcd
Cruzas			
Chalqueño x Tabloncillo			
C. Univ. Orig. x Jal. 63 Orig.	5.4 abc	298 abc	96.0 cdefg
C. Univ. Mej. x Jal. 63 Adapt.	5.5 abc	302 ab	88.7 fg
C. Univ. Orig. x Jal. 63 Adapt.	6.6 ab	296 abcd	89.2 efg
C. Univ. Mej. x Jal. 63 Orig.	5.5 abc	293 abcd	97.5 cdef
Chalqueño x Tepecintle			
C. Univ. Orig. x Chis. 76 Orig.	6.1 abc	297 abc	93.0 defg
C. Univ. Mej. x Chis. 76 Adapt.	7.0 a	311 ab	97.5 cdef
C. Univ. Orig. x Chis. 76 Adapt.	6.0 abc	304 ab	98.5 cdef
C. Univ. Mej. x Chis. 76 Orig.	5.4 abc	309 ab	96.0 cdefg
Chalqueño x Comiteco			
C. Univ. Orig. x Chis. 39 Orig.	6.4 ab	318 a	103.7 bc
C. Univ. Mej. x Chis. 39 Adapt.	7.1 a	315 a	98.7 cdef
C. Univ. Orig. x Chis. 39 Adapt.	7.3 a	307 ab	99.0 cde
C. Univ. Mej. x Chis. 39 Orig.	6.6 ab	318 a	103.7 bc
Exótica Adaptada x Exótica Original			
Jal. 63 Adapt. x Jal. 63 Orig.	6.6 ab	247 efg	86.7 g
Chis. 76 Adapt. x Chis. 76 Orig.	5.0 abc	258 def	94.2 cdefg
Chis. 39 Adapt. x Chis. 39 Orig.	7.1 a	308 ab	111.2 ab
Medias	5.7	289	98.6

Medias con la misma letra dentro de cada variable son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba Tukey al 0.05.

2.5.2 Análisis por contrastes

La comparación de los promedios de los Progenitores Originales (PO) con los de los Progenitores Mejorados (PM) detectó diferencias ($P \leq 0.01$) para las variables RTO y DFM (Cuadro 5), lo que indicó que los PM superaron en rendimiento a los PO y que además fueron más precoces, aunque en AP no hubo diferencias. Este resultado confirma que los materiales mejorados tuvieron alta frecuencia de genes favorables para rendimiento y precocidad, lo cual es un reflejo positivo de su adaptación lograda por la selección para rendimiento. Esto está en concordancia con lo señalado por Morales *et al.* (2007) en el sentido de que el rendimiento de grano y la precocidad son las variables más importantes para definir la estructura de la variabilidad fenotípica entre materiales genéticos adaptados y exóticos originales.

En las demás comparaciones no existieron diferencias entre los promedios de VLO y VLM (segundo contraste) para las tres variables, ni entre los promedios de VEO y VEA (tercer y cuarto contraste) (Cuadro 5). No obstante, se observó una tendencia hacia mayor RTO y precocidad en las cruzas donde intervinieron las VEA, lo cual es un indicador del efecto favorable que tuvo la selección por rendimiento en la adaptación de las variedades exóticas.

Cuadro 5. Contraste ortogonal de promedios a través de ambientes de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).

CONTRASTES	RTO (t ha ⁻¹)	AP (cm)	DFM (días)
1. Progenitores Orig. vs. Progenitores Mej.	-1.5**	1.4	9.7**
2. (VLO x VE) vs. (VLM x VE)	0.1	-4.8	-0.4
3. (VLO x VEO) vs. (VLO x VEA)	-2.1	5.0	6.0
4. (VLM x VEO) vs. (VLM x VEA)	-2.1	-7.3	12.3*

*,** Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad. VLO= Variedad Local Original; VLM= Variedad Local Mejorada; VE= Variedades exóticas; VEO= Variedad Exótica Original; VEA= Variedad Exótica Adaptada.

Con el objeto de probar con mayor detalle que las variedades locales (originales y mejoradas) y las exóticas adaptadas contribuyeron con alelos dominantes favorables de adaptación, en las cruzas donde uno de los progenitores fue una variedad exótica original, se hicieron más contrastes

ortogonales; para ello se dividieron las poblaciones según su grado de mejoramiento genético (Cuadros 6 y 7).

Según el Cuadro 6, al comparar las variedades Compuesto Universal Original y Jalisco 63 Original con su cruce (C. Univ. Orig. x Jal. 63 Orig.) se observó que en RTO, la variedad local tuvo mayor promedio que la exótica, esto se explica porque en la cruce los genes de la variedad local original (variedad de origen templado y adaptada) fueron dominantes sobre los genes de la variedad exótica (inadaptada). En AP ambas variedades resultaron iguales, pero en DFM la variedad exótica fue más tardía (primero y segundo contrastes) por estar inadaptada. Por otro lado, al comparar el Compuesto Universal Original y Jalisco 63 Adaptado con su cruce (C. Univ. Orig. x Jal. 63 Adapt.) se observó que el RTO de la cruce fue superior, aunque dicha diferencia no fue significativa sobre ambos progenitores, y que ésta no resultó más precoz, pero en AP sólo Jalisco 63 Adaptada fue de menor porte que la cruce. Estos resultados confirman que en cruces donde interviene la variedad exótica adaptada, esta también contribuye con genes favorables dominantes en la F₁ de la cruce (C. Univ. Orig. x Jal. 63 Adapt.).

Al comparar la variedad local Compuesto Universal Original y exótica Chiapas 76 Original con su cruce (C. Univ. Orig. x Chis. 76 Orig.) se observó que en RTO y AP la variedad local fue de mayor promedio que la exótica; en DFM sucedió lo contrario, pues la variedad exótica resultó más tardía. Por otro lado, al comparar Compuesto Universal Original y Chiapas 76 Adaptado con su cruce (C. Univ. Orig. x Chis. 76 Adapt.) se observó el mismo comportamiento, con excepción de que en la variable DFM no hubo significancia estadística. Estos resultados confirman que efectivamente la variedad exótica adaptada contribuyó con genes favorables dominantes en las cruces con la raza Tepecintle.

En los últimos contrastes se observó que la variedad local Compuesto Universal Original fue de mejor comportamiento que Chiapas 39 Original en las variables RTO y AP, aunque en DFM la variedad exótica fue más precoz; de igual manera, al observar el comportamiento de la cruce (C. Univ. Orig. x Chis. 39 Adapt.) con sus progenitores, nuevamente la variedad local fue muy superior en RTO a la variedad exótica; en AP la variedad local no se diferenció del promedio manifestado por la cruce; por su parte, la variedad Chiapas 39 Adaptada resultó de menor porte. Los resultados

anteriores tienen su explicación en el hecho de que en las cruzas los genes de la variedad local fueron dominantes sobre los genes de las variedades exóticas pertenecientes a la raza Tepecintle y Comiteco, aunque dichas cruzas mostraron siempre un mejor comportamiento agronómico que su progenitor exótico en forma *per se*.

Cuadro 6. Contraste ortogonal entre promedios de Progenitores *vs* Cruzas con la Variedad Local Original, a través de ambientes de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).

CONTRASTES	RTO (t ha ⁻¹)	AP (cm)	DFM (días)
C. Univ. Orig. <i>vs.</i> (C. Univ. Orig. x Jal. 63 Orig.)	0.5	2.9	2.2
Jal. 63 Orig. <i>vs.</i> (C. Univ. Orig. x Jal. 63 Orig.)	-1.7*	-0.4	18.7**
C. Univ. Orig. <i>vs.</i> (C. Univ. Orig. x Jal. 63 Adapt.)	-0.7	4.4	9.0**
Jal. 63 Adapt. <i>vs.</i> (C. Univ. Orig. x Jal. 63 Adapt.)	-0.4	-58.6**	1.8
C. Univ. Orig. <i>vs.</i> (C. Univ. Orig. x Chis. 76 Orig.)	-0.2	3.7	5.2
Chis. 76 Orig. <i>vs.</i> (C. Univ. Orig. x Chis. 76 Orig.)	-3.9**	-80.4**	6.0*
C. Univ. Orig. <i>vs.</i> (C. Univ. Orig. x Chis. 76 Adapt.)	-0.1	-2.9	-0.3
Chis. 76 Adapt. <i>vs.</i> (C. Univ. Orig. x Chis. 76 Adapt.)	-2.0**	-42.1**	-0.3
C. Univ. Orig. <i>vs.</i> (C. Univ. Orig. x Chis. 39 Orig.)	-0.5	-16.7	-5.5*
Chis. 39 Orig. <i>vs.</i> (C. Univ. Orig. x Chis. 39 Orig.)	-2.3**	-43.9**	11.5**
C. Univ. Orig. <i>vs.</i> (C. Univ. Orig. x Chis. 39 Adapt.)	-1.4*	-6.5	-0.8
Chis. 39 Adapt. <i>vs.</i> (C. Univ. Orig. x Chis. 39 Adapt.)	-2.4**	-24.6*	2.3

*,** Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad. C. Univ. Orig.= Compuesto Universal Original; Jal. 63 Orig.= Jalisco 63 Original; Jal. 63 Adapt.= Jalisco 63 Adaptado; Chis. 76 Orig.= Chiapas 76 Original; Chis. 76 Adapt.= Chiapas 76 Adaptado; Chis. 39 Orig.= Chiapas 39 Original y Chis. 39 Adapt.= Chiapas 39 Adaptado.

En el Cuadro 7 se observó que al comparar el rendimiento de la variedad local Compuesto Universal Mejorado y exótica Jalisco 63 Original con su cruce (C. Univ. Mej. x Jal. 63 Orig.) la variedad local tuvo mayor promedio que la exótica; esto se explica por el hecho de que los genes de la variedad local mejorada (adaptada) fueron dominantes sobre los genes de la variedad exótica Jalisco 63 Original (inadaptada). En AP ambas variedades resultaron iguales; pero en DFM la variedad exótica fue más tardía (primero y segundo contrastes).

Por otro lado, al comparar el Compuesto Universal Mejorado y Jalisco 63 Adaptado con su cruce (C. Univ. Mej. x Jal. 63 Adapt.), en RTO, las variedades progenitoras superaron a su cruce,

aunque estas diferencias no fueron significativas, y también resultaron más bajas en AP y tardías (contrastes tercero y cuarto). Los resultados anteriores confirman que efectivamente la variedad exótica adaptada contribuyó con genes favorables dominantes en la F₁ de la cruza (C. Univ. Mej. x Jal. 63 Adapt.) y que además de los efectos aditivos de los genes de cada progenitor, existe la posibilidad de que se presenten interacciones positivas entre los genes de loci diferentes dando como resultado las significancias de las diferencias entre los promedios de RTO para algunas cruzas del Compuesto Universal Mejorado con Jalisco 63 Adaptado.

En las variables evaluadas, al comparar el Compuesto Universal Mejorado con la cruza C. Univ. Mej. x Chis. 76 Orig. no existieron diferencias estadísticas significativas; es decir, el comportamiento del progenitor fue muy similar al de su cruza. Por el contrario, al comparar con respecto al progenitor exótico Chiapas 76 Original, sí existieron diferencias en RTO y AP, pues tuvieron promedios muy bajos. En la comparación de la cruza C. Univ. Mej. x Chis. 39 Adapt. con sus variedades progenitoras se observó la misma tendencia, pues el progenitor local no difirió de la cruza y resultó con mejor promedio con respecto a la variedad exótica adaptada.

Al comparar la cruza C. Univ. Mej. x Chis. 39 Orig. con el progenitor local, éste solo difirió en DFM, pues la cruza fue más tardía; para RTO y AP no hubo diferencias estadísticas entre ambos. Por otro lado, en la comparación con el progenitor exótico original, sí existieron diferencias en las tres variables evaluadas, pues la cruza siempre fue más productiva, de plantas altas y más precoces. Resultados similares se encontraron en la comparación de Chiapas 39 Adaptado con la cruza C. Univ. Mej. x Chis. 39 Adapt., sólo que en DFM no hubieron diferencias significativas.

Cuadro 7. Contraste ortogonal entre promedios de Progenitores *vs* Cruzas con la Variedad Local Mejorada, a través de ambientes de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).

CONTRASTES	RTO (t ha ⁻¹)	AP (cm)	DFM (días)
C. Univ. Mej. <i>vs.</i> (C. Univ. Mej. x Jal. 63 Orig.)	1.0	7.5	0.2
Jal. 63 Orig. <i>vs.</i> (C. Univ. Mej. x Jal. 63 Orig.)	-1.8*	4.3	17.2**
C. Univ. Mej. <i>vs.</i> (C. Univ. Mej. x Jal. 63 Adapt.)	1.1	-1.5	9.0**
Jal. 63 Adapt. <i>vs.</i> (C. Univ. Mej. x Jal. 63 Adapt.)	0.8	-64.4**	2.3
C. Univ. Mej. <i>vs.</i> (C. Univ. Mej. x Chis. 76 Orig.)	1.2	-8.7	1.7
Chis. 76 Orig. <i>vs.</i> (C. Univ. Mej. x Chis. 76 Orig.)	-3.1**	-92.8**	3.0
C. Univ. Mej. <i>vs.</i> (C. Univ. Mej. x Chis. 76 Adapt.)	-0.4	-9.9	0.2
Chis. 76 Adapt. <i>vs.</i> (C. Univ. Mej. x Chis. 76 Adapt.)	-2.9**	-49.0**	0.7
C. Univ. Mej. <i>vs.</i> (C. Univ. Mej. x Chis. 39 Orig.)	0.0	-17.4	-6.0*
Chis. 39 Orig. <i>vs.</i> (C. Univ. Mej. x Chis. 39 Orig.)	-2.5**	-44.5**	11.5**
C. Univ. Mej. <i>vs.</i> (C. Univ. Mej. x Chis. 39 Adapt.)	-0.6	-14.5	-1.0
Chis. 39 Adapt. <i>vs.</i> (C. Univ. Mej. x Chis. 39 Adapt.)	-2.2**	-32.5**	2.7

*,** Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad. C. Univ. Mej. = Compuesto Universal Mejorado; Jal. 63 Orig.= Jalisco 63 Original; Jal. 63 Adapt.= Jalisco 63 Adaptado; Chis. 76 Orig.= Chiapas 76 Original; Chis. 76 Adapt.= Chiapas 76 Adaptado; Chis. 39 Orig.= Chiapas 39 Original y Chis. 39 Adapt.= Chiapas 39 Adaptado.

Para aportar más evidencia de que los genes relativos al RTO de las variedades exóticas adaptadas (VEA) fueron dominantes sobre los genes de inadaptación de las variedades exóticas originales (VEO), se comparó el promedio de cada tipo de variedad con el promedio de su cruce (VEA x VEO) (Cuadro 8). Con esta comparación resultó lo esperado, ya que el valor del contraste VEA *vs* (VEA x VEO) fue igual a cero, mientras que el del contraste VEO *vs* (VEA x VEO) fue diferente de cero y significativo.

De acuerdo con los resultados mostrados en el Cuadro 8, la predicción se cumplió para la variable RTO en todos los contrastes, excepto en la comparación de la raza Comiteco Adaptado. Esta excepción pudo deberse a que la variedad Chiapas 39 aún presenta problemas de inadaptación en comparación con el resto de las variedades (Cuadro 4), o que en ella intervinieron efectos de variación ecológica (Molina, 1992). Por su parte Pérez *et al.* (2002) consideran a la raza Comiteco como de adaptación moderada.

Cuadro 8. Contraste ortogonal entre promedios de Progenitores Exóticos vs Cruzas (VEA x VEO) a través de ambientes, de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).

CONTRASTES	RTO (t ha ⁻¹)	AP (cm)	DFM (días)
Jal. 63 Adapt. vs. (Jal. 63 Adapt. x Jal. 63 Orig.)	-0.3	-9.2	4.3
Jal. 63 Orig. vs. (Jal. 63 Adapt. x Jal. 63 Orig.)	-2.8**	50.5**	28.0**
Chis. 76 Adapt. vs. (Chis. 76 Adapt. x Chis. 76 Orig.)	-1.0	3.2	4.0
Chis. 76 Orig. vs. (Chis. 76 Adapt. x Chis. 76 Orig.)	-2.8**	-41.8**	4.8
Chis. 39 Adapt. vs. (Chis. 39 Adapt. x Chis. 39 Orig.)	-2.2**	-24.9*	-9.8**
Chis. 39 Orig. vs. (Chis. 39 Adapt. x Chis. 39 Orig.)	-3.0**	-33.9**	4.0

*,** Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad. Jal. 63 Orig.= Jalisco 63 Original; Jal. 63 Adapt.= Jalisco 63 Adaptado; Chis. 76 Orig.= Chiapas 76 Original; Chis. 76 Adapt.= Chiapas 76 Adaptado; Chis. 39 Orig.= Chiapas 39 Original y Chis. 39 Adapt.= Chiapas 39 Adaptado.

2.5.3 Componentes del rendimiento

Las correlaciones fenotípicas mostraron una estrecha relación del rendimiento de grano con sus componentes: PCG, VCG, LM, DM, NGH y también con AP (Cuadro 9); esto indica que dichos caracteres cambiaron en el mismo sentido y proporción conforme se efectuó la selección para adaptación, lo que sugiere al aspecto de mazorca como un criterio de selección al influir directamente sobre los componentes de rendimiento (Pérez *et al.*, 2000 y 2002). Por el contrario, los caracteres DFM, AM y NHM sufrieron cambios, pero no significativos con respecto al RTO; es decir, que su aportación al carácter fue de muy poca magnitud. Por otro lado, la AP aumentó y los DFM se redujeron. Adicionalmente, en la variable IPM se observó un coeficiente negativo y altamente correlacionado con el RTO (-0.34) lo que explica, que a medida que el rendimiento de grano aumenta, la relación entre altura de mazorca y altura de planta disminuye, comportamiento favorable desde el punto de vista agronómico, ya que esto podría disminuir la incidencia de acame en la planta, además de que facilitaría la cosecha. Comúnmente las variedades de maíz presentan variación en AP y AM, y consecuentemente en su relación (AM/AP). Según Molina *et al.* (1988) dicha variación se debe a una respuesta de las poblaciones al efecto de la selección natural o artificial para adaptarse al ambiente en el que se desarrollan, y dicha respuesta no necesariamente corresponde a la condición genética óptima para producir el máximo rendimiento.

Cuadro 9. Correlaciones fenotípicas del rendimiento de grano con sus componentes y otras variables en promedio de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).

Carácter	Coefficiente de correlación de Pearson
Peso de 100 granos (PCG) [†]	0.57**
Volumen de 100 granos (VCG) [†]	0.44**
Longitud de mazorca (LM) [†]	0.41**
Diámetro de mazorca (DM) [†]	0.51**
Número de hileras por mazorca (NHM) [†]	0.20
Número de granos por hilera (NGH) [†]	0.56**
Días a floración masculina (DFM)	0.22
Altura de la planta (AP)	0.44**
Altura de mazorca (AM) [†]	0.15
Índice de posición de mazorca (IPM)	-0.34**

[†] Caracteres evaluados solo en el ciclo P-V 2012.

En el Cuadro 10 se muestra el comportamiento de las poblaciones con respecto a los componentes de rendimiento que correlacionaron positivamente (Cuadro 9). En dicho Cuadro se puede observar que la variedad Jalisco 63 Adaptada sobresalió como la de mejor peso, volumen y longitud de mazorca con respecto al resto de progenitores, aspectos que contribuyeron en gran medida al buen rendimiento de grano presentado por dicha variedad (6.3 t ha⁻¹).

Las variedades pertenecientes a la raza Chalqueño destacaron por su mejor rendimiento de grano, debido principalmente a una mayor longitud y diámetro de mazorca, y por tener un número de granos por hilera abundante. Cabe destacar que el peso y volumen de grano en estas variedades fue también aceptable (Cuadro 10). Por otro lado, la variedad Chiapas 76 Original presentó comportamiento poco favorable en todos los caracteres de los componentes del rendimiento.

Las cruzas que presentaron mejor comportamiento con base en sus componentes de rendimiento, en su mayoría fueron las conformadas por la raza Chalqueño por Tabloncillo. Cabe mencionar que en la variable longitud de mazorca también destacaron todas las cruzas Chalqueño por Comiteco, además de Jal. 63 Adapt. x Jal. 63 Orig. y Chis. 39 Adapt. x Chis. 39 Orig. Las

cruzas con peor expresión en sus componentes del rendimiento fueron: Chis. 76 Adapt. x Chis. 76 Orig. y Chis. 39 Adapt. x Chis. 39 Orig.

La mayoría de las poblaciones (progenitores y cruzas) presentaron un IPM intermedio comprendido entre 0.62 y 0.71, por lo que su posición de mazorca estuvo por encima de la mitad, con excepción de las variedades progenitoras Chiapas 39 Original y Jalisco 63 Adaptada, cuyo IPM fue el más alto y el más bajo (0.75 y 0.59, respectivamente). Lo anterior coincide con Molina *et al.* (1988) quienes reportan índices óptimos de posición de mazorca de 0.5 en variedades precoces y 0.6 en intermedias; estos autores también señalan la posibilidad de obtener IPM óptimos, sin la modificación de otros caracteres agronómicos como altura de planta y días a floración. Cabe mencionar que el proceso de selección para adaptación produjo algunos cambios inconsistentes en las variedades, ya que en el Compuesto Universal Mejorado mientras la AP se mantuvo, su IPM aumentó; en Jalisco 63 Adaptada a medida que aumentó la AP, también aumentó su IPM, en Chiapas 76 Adaptada se observó un aumento en el porte de planta, y disminución de IPM; por el contrario, Chiapas 39 Adaptada aumentó su AP y disminuyó su IPM.

Cuadro 10. Comparación de medias de los componentes del rendimiento y otras variables de 23 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclo 2012).

TRATAMIENTOS	PCG [†]	VCG [†]	LM [†]	DM [†]	NGH [†]	IPM
Progenitores						
C. Univ. Original (Chalqueño)	34.0 abcd	50.3 abc	14.0 a	5.1 abc	30.0 ab	0.68 ab
C. Univ. Mejorado (Chalqueño)	36.8 abcd	44.0 abc	14.1 a	5.4 a	26.6 abcd	0.70 ab
Jalisco 63 Original (Tabloncillo)	21.8 gh	35.6 bcd	12.3 ab	4.7 bcde	27.3 abc	0.69 ab
Jalisco 63 Adaptado (Tabloncillo)	39.8 ab	60.0 a	14.1 a	4.5 cdef	26.6 abcd	0.59 b
Chiapas 76 Original (Tepecintle)	14.6 h	22.3 d	8.9 b	3.5 g	20.6 d	0.65 ab
Chiapas 76 Adaptado (Tepecintle)	24.3 fg	34.3 cd	11.8 ab	4.2 ef	25.0 bcd	0.71 ab
Chiapas 39 Original (Comiteco)	24.9 fg	35.3 cd	14.1 a	4.1 f	27.6 abc	0.75 a
Chiapas 39 Adaptado (Comiteco)	25.2 efg	34.6 cd	14.0 a	4.2 ef	30.0 ab	0.66 ab
Cruzas						
Chalqueño x Tabloncillo						
C. Univ. Orig. x Jal.63 Orig.	39.1 abc	57.3 a	14.8 a	5.2 ab	28.6 abc	0.68 ab
C. Univ. Mej. x Jal.63 Adapt.	39.2 abc	56.3 a	13.0 ab	4.8 bcde	26.0 bcd	0.64 ab
C. Univ. Orig. x Jal.63 Adapt.	40.2 a	59.3 a	12.4 ab	4.9 abc	29.0 abc	0.64 ab
C. Univ. Mej. x Jal.63 Orig.	34.5 abcd	52.3 ab	14.0 ab	4.9 abc	28.3 abc	0.65 ab
Chalqueño x Tepecintle						
C. Univ. Orig. x Chis. 76 Orig.	30.5 def	45.0 abc	12.8 ab	4.5 cdef	27.0 abc	0.66 ab
C. Univ. Mej. x Chis. 76 Adapt.	36.6 abcd	51.0 abc	14.0 ab	5.1 abc	27.0 abc	0.65 ab
C. Univ. Orig. x Chis. 76 Adapt.	33.8 abcd	48.6 abc	14.6 ab	4.7 bcdef	27.6 abc	0.62 ab
C. Univ. Mej. x Chis. 76 Orig.	34.5 abcd	49.6 abc	12.8 ab	4.9 abc	27.0 abc	0.68 ab
Chalqueño x Comiteco						
C. Univ. Orig. x Chis. 39 Orig.	33.9 abcd	48.3 abc	14.9 a	4.8 abcd	30.0 ab	0.65 ab
C. Univ. Mej. x Chis. 39 Adapt.	33.3 abcd	47.3 abc	14.7 a	4.9 abc	28.3 abc	0.65 ab
C. Univ. Orig. x Chis. 39 Adapt.	32.2 cde	47.0 abc	15.0 a	4.9 abc	32.3 a	0.63 ab
C. Univ. Mej. x Chis. 39 Orig.	32.8 bcd	47.3 abc	15.5 a	5.0 abc	31.0 ab	0.70 ab
Exótica Adaptada x Exótica Original						
Jal.63 Adapt. x Jal.63 Orig.	39.5 ab	59.6 a	14.1 a	4.5 cdef	27.0 abc	0.66 ab
Chis. 76 Adapt. x Chis. 76 Orig.	25.4 efg	36.0 bcd	11.3 ab	4.1 f	23.3 cd	0.67 ab
Chis. 39 Adapt. x Chis. 39 Orig.	25.3 efg	34.6 cd	14.8 a	4.3 def	31.0 ab	0.67 ab
Medias	31.8	45.9	13.6	4.7	27.7	0.66

PCG= Peso de 100 granos (g); VCG= Volumen de 100 granos (ml); LM= Longitud de mazorca (cm); DM= Diámetro de mazorca (cm), NGH= Número de granos por hilera e IPM= Índice de posición de mazorca. [†] Caracteres evaluados solo en el ciclo P-V 2012.

2.5.4 Heterosis de las cruzas

Para RTO existieron valores positivos de heterosis estimada con respecto al progenitor medio (H_{PM}) en la mayoría de las cruzas de la variedad local con las variedades exóticas (Cuadro 11). Los valores más altos de H_{PM} para RTO resultaron en las cruzas Chis. 39 Adapt. x Chis. 39 Orig., Chis.76 Adapt. x Chis.76 Orig., y C. Univ. Orig. x Chis.76 Orig. (61.4, 61.3 y 52.5%, respectivamente); siendo las primeras dos cruzas las que manifestaron la máxima expresión con respecto al progenitor superior (44.9 y 25%, respectivamente). La heterosis general promedio de las cruzas fue 27.4%, porcentajes relevantes superiores a los reportados por Malik *et al.* (2004) en su evaluación sobre heterosis en germoplasma de maíz templado, tropical y subtropical (17.2). Además, para Gutiérrez *et al.* (2002) y De la Cruz *et al.* (2003), en el mejoramiento genético de maíz, el nivel deseable para aprovechamiento de la heterosis en una craza es cuando menos de 20%.

El resultado anterior genera controversia, pues en teoría los niveles más altos de heterosis se obtienen en los cruzamientos entre progenitores con diferente origen genético y geográfico (Moll *et al.*, 1965; Peña *et al.*, 2012), situación que sólo las cruzas Chalqueño por Tepecintle cumplen; sin embargo, la divergencia genética es una condición necesaria, pero no siempre es suficiente para asegurar una expresión alta de heterosis, teniendo en cuenta que efectos positivos de heterosis se atribuyen principalmente a efectos genéticos y de interacción (Esquivel *et al.*, 2011).

Por otro lado, debe resaltarse que la estructura de la ecuación usada para estimar heterosis, tiende a producir valores altos cuando alguno de los progenitores presenta un comportamiento pobre; de modo que las variedades Chiapas 39 y Chiapas 76 presentaron porcentajes altos de H_{PM} , porque el rendimiento de su craza fue bajo o intermedio, resultados que fueron similares a los encontrados por Morales *et al.* (2007) y Esquivel *et al.* (2011) en sus trabajos con cruzas de germoplasma de maíz de diferente origen geográfico. Puede afirmarse entonces, que la formación de cruzamientos sobresalientes, está relacionada con el área de distribución geográfica de las razas Chalqueño y Tepecintle, y que dichas poblaciones podrían considerarse como un patrón heterótico potencial para la formación de híbridos de alto rendimiento, coincidiendo esto, con lo afirmado

por Holland (2004), en el sentido de que las cruzas de poblaciones locales con exóticas exhiben alta heterosis y son la base para la formación de nuevos híbridos comerciales.

En AP se observaron valores positivos de H_{PM} , principalmente en las cruzas de la raza Chalqueño por Tepecintle y Chalqueño por Comiteco (13.2 y 8.6 %, en promedio), y los porcentajes de H_{PS} presentaron la misma tendencia en dichas cruzas. En la variable DFM los porcentajes de H_{PM} y H_{PS} fueron negativos en la mayoría de las cruzas, excepto en C. Univ. Orig. x Chis. 76 Adapt. y Chis. 39 Adapt. x Chis. 39 Orig. con 0.3 y 2.8 % de H_{PM} . Esto desde el punto de vista práctico es favorable, ya que representan cruzas con disminución en el porte de planta y que, además, presentan un ciclo vegetativo más corto en comparación con sus progenitores.

Cuadro 11.- Valores de Heterosis de cruzas intervarietales entre la variedad local y variedades exóticas (originales y adaptadas), promedio de progenitores y F₁ para tres variables en dos ambientes de evaluación.

CRUZAS	RTO				AP				DFM			
	P	F ₁	% H _{PM}	% H _{PS}	P	F ₁	% H _{PM}	% H _{PS}	P	F ₁	% H _{PM}	% H _{PS}
Chalqueño x Tabloncillo												
C. Univ. Orig. x Jal. 63 Orig.	4.8	5.4	12.5	-8.5	299	298	-0.3	-1.0	106.4	96.0	-9.8	-16.3
C. Univ. Mej. x Jal. 63 Adapt.	6.4	5.5	-14.1	-16.7	269	302	12.3	0.3	94.3	88.7	-5.9	-9.2
C. Univ. Orig. x Jal. 63 Adapt.	6.1	6.6	8.2	4.8	269	296	10.0	-1.7	94.6	89.2	-5.7	-9.2
C. Univ. Mej. x Jal. 63 Orig.	5.2	5.5	5.8	-16.7	299	293	-2.0	-2.7	106.2	97.5	-8.2	-15.0
Chalqueño x Tepecintle												
C. Univ. Orig. x Chis. 76 Orig.	4.0	6.1	52.5	3.4	259	297	14.7	-1.3	98.6	93.0	-5.7	-6.1
C. Univ. Mej. x Chis. 76 Adapt.	5.3	7.0	32.1	6.1	281	311	10.7	3.3	97.9	97.5	-0.4	-0.7
C. Univ. Orig. x Chis. 76 Adapt.	4.9	6.0	22.4	1.7	281	304	8.2	1.0	98.2	98.5	0.3	0.3
C. Univ. Mej. x Chis. 76 Orig.	4.4	5.4	22.7	-18.2	259	309	19.3	2.7	98.3	96.0	-2.3	-3.0
Chalqueño x Comiteco												
C. Univ. Orig. x Chis. 39 Orig.	4.9	6.4	30.6	8.5	287	318	10.8	5.6	106.7	103.7	-2.8	-10.0
C. Univ. Mej. x Chis. 39 Adapt.	5.7	7.1	24.6	7.6	292	315	7.9	4.7	99.5	98.7	-0.8	-2.6
C. Univ. Orig. x Chis. 39 Adapt.	5.4	7.3	35.2	23.7	292	307	5.1	2.0	99.7	99.0	-0.7	-2.3
C. Univ. Mej. x Chis. 39 Orig.	5.3	6.6	24.5	0.0	287	318	10.8	5.6	106.4	103.7	-2.5	-10.0
Exótica Adaptada x Exótica Original												
Jal. 63 Adapt. x Jal. 63 Orig.	5.0	6.6	32.0	4.8	267	247	-7.5	-16.8	102.8	86.7	-15.7	-24.4
Chis. 76 Adapt. x Chis. 76 Orig.	3.1	5.0	61.3	25.0	239	258	7.9	-1.5	98.6	94.2	-4.5	-4.8
Chis. 39 Adapt. x Chis. 39 Orig.	4.4	7.1	61.4	44.9	278	308	10.8	8.8	108.2	111.2	2.8	-3.5
Promedios	4.9	6.2	27.4	4.6	277	299	7.9	0.6	101.1	96.9	-4.1	-7.7

P= promedio de los progenitores en t ha⁻¹; F₁= promedio de la craza en t ha⁻¹; H_{PM}= Heterosis por progenitor medio y H_{PS}= Heterosis por progenitor superior.

2.6 CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de la presente investigación, las variedades exóticas adaptadas aumentaron su rendimiento por la selección de las mejores plantas y mazorcas, y este aumento gradual se debió principalmente al aumento en los componentes de rendimiento, tales como longitud y diámetro de mazorca, lo que dio como resultado un mayor número, tamaño y peso de granos. Se infiere que este proceso de selección aumentó la frecuencia de genes favorables al carácter y por ende también se aumentó el grado de adaptación de las mismas. Esto se comprobó al comparar el rendimiento *per se* de los progenitores exóticos adaptados con el rendimiento de sus progenitores originales.

Los resultados permiten establecer que las variedades exóticas adaptadas manifiestan su expresión genética de manera dominante cuando se cruzan con variedades exóticas originales o variedades locales con poco mejoramiento. Esto se pudo verificar al comparar el promedio de rendimiento de la variedad exótica original con el de la cruce variedad exótica adaptada x variedad exótica original, cuyo valor del contraste respectivo fue diferente de cero y significativo, en favor de la variedad adaptada. Por otro lado, la cruce de la raza Chalqueño con la raza Tepecintle tuvo la expresión más alta de heterosis, formando un patrón heterótico potencial para la formación de híbridos de alto rendimiento. Finalmente, se comprueba la importancia de utilizar germoplasma exótico tropical adaptado para formar nuevas cruces de maíz con alelos de interés para la región de los Valles Altos de México.

2.7 LITERATURA CITADA

- Beck, L. D., S. Vasal K. and J. Crossa (1991)** Heterosis and combining ability among subtropical and temperate intermediate maturity maize germplasm. *Crop Science*. 31: 68-73.
- De la Cruz L., L., J. Ron P., J. L. Ramírez D., J. J. Sánchez G., M. M. Morales R., M. Chuela B., S. A. Hurtado de P. y S. Mena M. (2003)** Heterosis y aptitud combinatoria entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de Maíz en Jalisco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 26 (1): 1-9.
- De la Cruz L., E., E. Gutiérrez del R., A. Palomo G. y S. Rodríguez H. (2003)** Aptitud combinatoria y heterosis de líneas de maíz en la Comarca Lagunera. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26 (4): 279-284.
- Esquivel E., G., F. Castillo G., J. M. Hernández C., A. Santacruz V., G. García de los S., J. A. Acosta G. y A. Ramírez H. (2011)** Heterosis en maíz del Altiplano de México con diferente grado de divergencia genética. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3 (2): 331-344.
- García E (1981)** Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 3a Edición. Instituto de Geografía. UNAM. México, D. F. pp: 252p.
- Gaytán B., R. y N. Mayek P. (2010)** Heterosis en híbridos de maíz producidos de cruzamientos entre progenitores de Valles Altos y Tropicales. *Investigación y Ciencia*. 48 (18): 4-8.
- Goodman, M. M. (1985)** Exotic maize germplasm: Status, prospects and remedies. *Iowa State Journal of Research*. 59: 497-527.
- Goodman, M. M. and M. Carson L. (2000)** Reality vs. myth: Corn breeding, exotic, and genetic engineering. *Annual Corn and Sorghum Research Conference*. 55: 140-172.
- Gutiérrez del R., E., A. Espinoza B., A. Palomo G., J. Lozano G. y O. Antuna G. (2004)** Aptitud combinatoria de híbridos de maíz para la Comarca Lagunera. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27 (Número Especial 1): 7-11.
- Holland, J. B. (2004)** Breeding: Incorporation of exotic germplasm. In *Encyclopedia of Plant and Crop Science*. Marcel Dekker Eds. pp: 222-224.
- Malik, H. N., S. Malik I., S. Chughtai R. and H. Javed I. (2004)** Estimates of heterosis among Temperate, Subtropical and Tropical Maize Germplasm. *Asian Journal of Plant Sciences* 3 (1): 6-10.
- Molina G., J. D. (1992)** Introducción a la Genética de Poblaciones y Cuantitativa. AGT Editor, México. 349 p.

- Molina G., J. D., R. Herrera M., T. Cervantes S. y A. Martínez G. (1988)** Selección para índice de posición de mazorca en cuatro variedades de Maíz (*Zea mays* L.). *Agrociencia*. 74: 115-130.
- Molina G., J. D. (1983)** Selección masal visual estratificada en maíz. Folleto Técnico. Centro de Genética. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 36 p.
- Morales R., M. M., J. Parra R., J. J. Sánchez G., J. L. Ramírez D., L. De la Cruz L., S. Mena M., S. Hurtado P. y M. Chuela B. (2007)** Relaciones fenotípicas y heterosis entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de Maíz en Jalisco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 30 (3): 285-294.
- Moll, R. H., W. Salhuana S. and H. Robinson F. (1962)** Heterosis and genetic diversity in variety crosses of Maize. *Crop Science* 2: 197-198.
- Navas A., A. A. y T. Cervantes S. (1991)** Selección para rendimiento y adaptación a Valles Altos en cruza interracial tropical de maíz de México. *Agrociencia*. 2(4): 97-113.
- Pérez C., A. A., J. D. Molina G., A. Martínez G., P. García M. y D. Reyes L. (2007)** Selección masal para la adaptación a clima templado de razas tropicales y sub-tropicales de maíz de México. *Bioagro*. 19(3): 133-141.
- Pérez C., A. A., J. D. Molina G. y A. Martínez G. (2002)** Adaptación a clima templado de razas tropicales y subtropicales de maíz de México por selección masal visual. Rendimiento, altura de planta y precocidad. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 25(4): 435-441.
- Pérez C., A. A., J. D. Molina G. y A. Martínez G. (2000)** Adaptación a clima templado de una variedad de maíz tropical mediante selección masal visual estratificada. *Agrociencia*. 34: 533-542.
- Peña R., A., F. González C., G. Núñez H., M. R. Tovar G., V. A. Vidal M. y J. L. Ramírez D. (2012)** Heterosis y aptitud combinatoria para la producción y calidad de forraje en seis poblaciones de Maíz. *Revista Mexicana Ciencia Pecuaria*. 3(3): 389-406.
- SAS Institute. (2003)** SAS/IML Software: Usage and reference. Versión 9.1. Ist. Ed. SAS Institute Inc., Cary, N.C.
- Wellhausen, E. J., L. Roberts M., E. Hernández X. en Colaboración con P.C. Mangelsdorf. (1951)** Razas de Maíz en México. Su origen, características y distribución. Folleto Técnico No. 5. Oficina de Estudios Especiales. Secretaría de Agricultura y Ganadería. México. 237 p.

CAPÍTULO III.

POBLACIONES EXÓTICAS ORIGINALES Y ADAPTADAS DE MAÍZ. II: VARIEDAD TROPICAL Y TEMPLADA x VARIEDADES TROPICALES

ORIGINAL AND ADAPTED EXOTIC POPULATIONS OF MAIZE. II: TROPICAL AND TEMPLATE VARIETY x TROPICAL VARIETIES

Ana Luisa Gómez -Espejo^{1*}, José D. Molina-Galán¹, J. Jesús García-Zavala¹, Ma. del Carmen Mendoza-Castillo¹, Alfredo de la Rosa-Loera.²

¹Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Colegio de Postgraduados, Km. 36.5 Carretera México-Texcoco, C.P. 56230, Montecillo, Texcoco, México. gomez.ana@colpos.mx.

²Departamento de Fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, 25315, Saltillo, Coahuila.

3.1 RESUMEN

Incrementar la variabilidad genética del germoplasma base es prioridad de todo programa de mejoramiento genético; por ello, el germoplasma de maíz (*Zea mays* L.) tropical es una buena opción para adaptarlo a clima templado, ya que ofrece variabilidad genética y morfológica para diversos caracteres. En este estudio se eligió al rendimiento de grano como la variable indicadora de la adaptación de los genotipos evaluados, y se postuló que los genes de adaptación tienen una expresión dominante sobre los genes de inadaptación en cruza F₁. Para comprobar lo anterior, se evaluaron 10 progenitores y 15 de sus cruza F₁. De las cruza, cuatro resultaron del cruzamiento de las variedades exóticas tropicales (originales y adaptadas) del Compuesto Tuxpeño Crema 1 con la variedad V-520C; otras ocho provinieron de cruzar variedades de la raza Cónico Norteño (original y adaptada) con dos variedades exóticas tropicales originales y adaptadas de las razas Nal-tel y Zapalote Chico, y tres más provinieron del apareamiento entre la versión adaptada y la original de cada raza exótica. Las cruza fueron de los tipos: variedad exótica original por variedad exótica original y adaptada, variedad exótica adaptada por variedad exótica original y adaptada, y variedad exótica original por su versión adaptada. Los caracteres estudiados fueron rendimiento (RTO), altura de planta (AP) y días a floración masculina (DFM). Los resultados mostraron que las poblaciones exóticas adaptadas superaron en RTO a sus respectivas variedades originales, y fueron más precoces y más altas. La mayoría de los contrastes ortogonales entre los promedios de RTO de las cruza fueron significativos y presentaron valores en favor de los materiales exóticos adaptados, lo que evidencia que en las cruza F₁ dominaron los genes de los progenitores adaptados sobre los de progenitores exóticos originales. Las cruza de variedades de las razas Cónico Norteño con Zapalote Chico y Tuxpeño manifestaron los valores de heterosis más altos (52 y 28 % en promedio, respectivamente), lo que se interpreta como un nuevo patrón heterótico.

Palabras clave: *Zea mays* L., razas exóticas tropicales, adaptación, selección masal, heterosis.

3.2 SUMMARY

Increasing the genetic variability of the basic germplasm is a priority to any plant breeding program. In that regard, the tropical germplasm of maize (*Zea mays* L.) is a good resource to adapt it to temperate climate, since it is a good source of genetic and morphologic variability for different traits. In this work it was evaluated the grain yield as the indicator trait of the adaptation of the genotypes evaluated, and it was also proposed that the genes for adaptation in an F₁ cross are dominant over the genes that cause inadaptation. To prove this, ten progenitors and 15 of their F₁ crosses were evaluated. From the 15 crosses, four were generated from the mating between varieties (in its original and selected versions) of the Tuxpeño race (Tuxpeño Crema 1 and Tuxpeño V-520C); eight crosses were obtained by crossing a variety (original and selected) of the Cónico Norteño race with varieties (original and selected) of the races Nal-Tel and Zapalote Chico; and three crosses resulted from the mating between the original and the selected (adapted) versions of each exotic race. Thus, the crosses evaluated were of the types: original exotic variety by original and adapted exotic varieties, improved exotic variety by original and adapted exotic varieties, and adapted exotic variety by its original version. Yield (RTO), plant height (AP) and days to male flowering (DFM) were the traits studied. Results indicated that the adapted exotic populations generally surpassed the RTO of their original versions and were also earlier and taller. On the other hand, most of the orthogonal contrasts of the averages of RTO among the crosses were significant and had values in favor of the adapted exotic populations; this result is an indicator of the validity of the assumption, which states that in the F₁ crosses the genes of the adapted progenitor were dominant over the genes of the original progenitor. Moreover, the crosses between varieties of Cónico Norteño and Zapalote Chico and Tuxpeño showed the higher values of heterosis (52% and 28%, respectively), evidencing a new heterotic pattern.

Key words: *Zea mays* L., adaptation, exotic races, heterosis, mass selection, tropical germplasm.

3.3 INTRODUCCIÓN

La enorme diversidad genética presente en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) ofrece una gama de oportunidades para su mejora genética, pues la existencia de alelos favorables en tan diverso germoplasma posibilita la creación de genotipos con mayor rendimiento, tolerancia a estreses abióticos, resistencia a enfermedades y plagas, e inclusive, de mejor calidad nutricional. Sin embargo, dichos objetivos dependen de la capacidad de los mejoradores de plantas para ampliar la base genética, y de herramientas que, además de ser rápidas, sean eficientes en la introgresión del nuevo germoplasma y sus genes favorables (Prasanna, 2012).

En el mejoramiento del maíz es plenamente aceptado que a mayor variabilidad del material básico, mayores son las posibilidades de selección, por lo que todo programa de mejora genética tiene por objetivo incrementar la variabilidad de su germoplasma, mediante la utilización de todo aquel recurso disponible, nativo o exótico, usado directamente o en combinaciones múltiples (IICA-BID-PROCIANDINO, 1991). La introgresión de germoplasma exótico en el mejoramiento de poblaciones ha sido propuesta como una medida para incrementar útilmente la variabilidad genética de los caracteres heredados cuantitativamente y para mejorar la respuesta a la selección (Albrech y Dudley, 1987; Bridges y Gardner, 1987).

Hallauer y Miranda (1988) definen al material exótico como germoplasma sin selección para adaptación que no tiene un uso inmediato, definición muy parecida a la de Goodman (1985). Holland (2004) señala que dentro del germoplasma exótico se incluyen variedades no adaptadas a un ambiente dado, y las considera un recurso importante en el mejoramiento de los cultivos, debido a que poseen genes que protegen al cultivo contra nuevos estreses bióticos y abióticos, y que pueden tener alelos únicos para incrementar la productividad y que no se encuentran en el germoplasma local.

Albrecht y Dudley (1987) mencionan que en la literatura existen tres razones para el uso de germoplasma exótico en los programas de mejoramiento, estas son: 1) la necesidad de incrementar la diversidad genética como una manera de proteger a los cultivos contra riesgos biológicos y ambientales impredecibles; 2) como una fuente de genes para caracteres específicos, tales como

resistencia a enfermedades, plagas y estrés; y 3) como una fuente de alelos favorables para rendimiento, al incrementar la variación genética útil y mejorar la heterosis de las poblaciones.

El uso de germoplasma tropical en los programas de mejoramiento de clima templado ha sido estudiado desde 1950 (Brown, 1953; Wellhausen, 1965); éste ha sido considerado una fuente valiosa de genes para la formación de híbridos con germoplasma de clima templado, ya que posee gran variabilidad genética en caracteres morfológicos, anatómicos y del rendimiento. Sin embargo, su uso ha sido limitado debido a su pobre adaptación y a su rendimiento de grano insuficiente (Bernardo, 2009). No obstante, se ha demostrado que mediante la metodología de selección masal la adaptación de germoplasma tropical a clima templado ha sido efectiva para precocidad y otras características agronómicas importantes (Bosch *et. al.*, 2003). Por ello, la presente investigación tuvo como objetivo: evaluar el comportamiento agronómico en forma *per se* y en cruzas, de poblaciones provenientes de clima tropical y templado, sometidas previamente a selección masal visual, para confirmar la efectividad de la selección en el proceso adaptativo. Se propone como hipótesis, que las poblaciones adaptadas presentan una alta carga de alelos favorables de tipo dominante para adaptación, las que al cruzarse con un material contrastante, transmitirán y expresarán los genes de adaptabilidad en la F₁. De manera adicional se evaluó el comportamiento heterótico de las cruzas interraciales.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluaron 10 variedades progenitoras representativas de cuatro razas de maíz de las 25 descritas por Wellhausen *et al.* (1951) y 15 cruzas simples intervarietales provenientes de combinaciones entre sí. Las 10 variedades son originarias de dos regiones climáticas: ocho variedades del trópico húmedo y dos de clima templado seco (Cuadro 12).

Cuadro 12. Variedades de maíz utilizadas como progenitores de las cruzas representativas de cada región.

	Raza	Variedad	Altitud (m)	Región de origen	Clave
1	Tuxpeño	Tuxp-crema 1 (Orig.)	0-500	Trópico húmedo	VEO-4
2	Tuxpeño	Tuxp-crema 1 (SMVE12)	0-500	Trópico húmedo	VEA-4
3	Tuxpeño	V520C (Orig.)	0-500	Trópico húmedo	VEO-5
4	Tuxpeño	V520C (SMV15)	0-500	Trópico húmedo	VEA-5
5	Cónico norteño	Zac.58 (Orig.)	2050	Templado seco	VEO-6
6	Cónico norteño	Zac.58 (SMVE24)	2050	Templado seco	VEA-6
7	Nal-tel	Yuc. 7 (Orig.)	100	Trópico húmedo	VEO-7
8	Nal-tel	Yuc. 7 (SMV17)	100	Trópico húmedo	VEA-7
9	Zapalote chico	Oax. 48 (Orig.)	100	Trópico húmedo	VEO-8
10	Zapalote chico	Oax. 48 (SMV15)	100	Trópico húmedo	VEA-8

VEO: Variedades exóticas originales, VEA: Variedades exóticas adaptadas; C=Ciclos de selección masal visual y SM=Ciclos de selección masal visual estratificada.

La selección para adaptación de las variedades exóticas originales (VEO) se inició en el ciclo primavera-verano (P-V) de 1989, en Montecillo, Edo. de México, su ubicación geográfica corresponde a las coordenadas 19° 27' 37.02" N y 98° 54' 24.02" O, y a 2247 m de altitud. El clima del lugar es del tipo C (Wo) (w)b(1)g, que corresponde al templado subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura media anual de 15 °C y una precipitación media anual de 750 mm, con una oscilación térmica de 5 a 7 °C (García, 1981).

A las poblaciones se les aplicó selección masal basada en el aspecto de planta y de mazorca. La selección en cada variedad se realizó en parcelas de 15 surcos de 10 m separados a 80 cm, y 30 cm entre plantas, realizándose polinizaciones fraternales con mezcla de polen entre las mejores plantas, teniéndose 510 plantas por variedad; a la cosecha se aplicó una presión de selección de 39.2 %, seleccionándose las mejores 200 mazorcas y con ellas se formó un compuesto balanceado

con igual número de semillas de cada mazorca. Este proceso se continuó por varios años hasta obtener 12 ciclos de selección masal visual estratificada (SMVE12) en el Compuesto Tuxpeño Crema 1 y 24 ciclos (SMVE24) en Zacatecas 58; y 15 ciclos de selección masal visual (SMV15) en V-520C y Oaxaca 48, y 17 ciclos (SMV17) en Yucatán 7; a estas variedades se les denominó variedades exóticas adaptadas (VEA).

En el ciclo primavera-verano (P-V) 2010, en Montecillo, Edo. de México, se formaron cruzas de los tipos: a) variedad exótica original por variedad exótica original y adaptada, b) variedad exótica adaptada por variedad exótica original y adaptada, y c) variedad exótica adaptada por su versión original (Cuadro 13).

Cuadro 13. Genealogía de las cruzas simples F₁ evaluadas.

Núm.	Genealogía de las cruzas	Clave
1	Tuxp-crema 1 (Orig.) x V520C (Orig.)	VEO-4 x VEO-5
2	Tuxp-crema 1 (Orig.) x V520C (SMV15)	VEO-4 x VEA-5
3	Tuxp-crema 1 (SMVE12) x V520C Orig.	VEA-4 x VEO-5
4	Tuxp-crema 1 (SMVE12) x V520C (SMV15)	VEA-4 x VEA-5
5	Zac. 58 (Orig.) x Yuc. 7 (Orig.)	VEO-6 x VEO-7
6	Zac. 58 (Orig.) x Yuc. 7 (SMV17)	VEO-6 x VEA-7
7	Zac. 58 (Orig.) x Oax. 48 (Orig.)	VEO-6 x VEO-8
8	Zac. 58 (Orig.) x Oax. 48 (SMV15)	VEO-6 x VEA-8
9	Zac. 58 (SMVE24) x Yuc. 7 (Orig.)	VEA-6 x VEO-7
10	Zac. 58 (SMVE24) x Yuc. 7 (SMV17)	VEA-6 x VEA-7
11	Zac. 58 (SMVE24) x Oax. 48 (Orig.)	VEA-6 x VEO-8
12	Zac. 58 (SMVE24) x Oax. 48 (SMV15)	VEA-6 x VEA-8
13	V520C (SMV15) x V520C (Orig.)	VEA-5 x VEO-5
14	Yuc. 7 (SMV17) x Yuc. 7 (Orig.)	VEA-7 x VEO-7
15	Oax. 48 (SMV15) x Oax. 48 (Orig.)	VEA-8 x VEO-8

VEO: Variedades exóticas originales y VEA: Variedades exóticas adaptadas.

Las 15 cruzas, más las 10 variedades progenitoras se evaluaron en Montecillo, Edo. de México, en dos ciclos agrícolas (P-V 2011 y P-V 2012). La parcela experimental consistió de dos surcos de 6 m separados a 80 cm; en cada surco hubo 16 matas de dos plantas cada 40 cm, dando una densidad de población de 66,600 plantas por hectárea. Se usó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La siembra fue manual, depositándose tres semillas por sitio para aclarar a dos plantas por mata, se aplicó un riego de germinación y demás riegos de

auxilio hasta el establecimiento de las lluvias. Se fertilizó con 120 kg N y 80 kg P₂O₅ ha⁻¹; todo el P₂O₅ y la mitad del N se aplicó a la siembra y el resto en la segunda escarda (30 días después de la siembra, dds). Se hicieron 2 pasos de cultivo, el primero 15-20 días después de la germinación y el segundo a los 30 días. La maleza se controló con el herbicida Gesaprim Calibre 90 GDA®, aplicado 7 dds en una dosis de 3 L ha⁻¹.

Se registraron los siguientes caracteres: rendimiento de mazorca a humedad constante por hectárea (RTO, t ha⁻¹), días a floración masculina (DFM), altura de la planta (AP, cm), altura de la mazorca (AM, cm), peso de 100 granos (PCG, g), volumen de 100 granos (VCG, ml), longitud de mazorca (LM, cm), diámetro de mazorca (DM, cm), número de hileras por mazorca (NHM), número de granos por hilera (NGH) e índice de posición de mazorca (IPM). Con excepción de RTO, DFM y APM, los demás caracteres fueron medidos solamente en el ciclo P-V 2012, debido a daños por heladas en el ciclo P-V 2011 que dificultaron las mediciones de los componentes, ya que las mazorcas resultaron afectadas con granos vanos, tomándose una muestra aleatoria de 10 plantas o 10 mazorcas en cada parcela y se registró el promedio de cada variable por planta o por mazorca. El carácter DFM se registró como el número de días transcurridos desde el riego de germinación hasta que la mitad de las plantas en cada parcela se encontraban en antesis. El IPM se obtuvo mediante la relación altura de mazorca/altura de planta.

A los datos obtenidos se les aplicó un análisis de varianza (ANAVA) combinando los dos ambientes, usando para ello el paquete estadístico SAS 9.1 (SAS, 2003). Los promedios se compararon con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Las fuentes de variación fueron Ambientes, Repeticiones/Ambientes, Poblaciones, Ambientes x Poblaciones, y Error. La suma de cuadrados de Poblaciones se partió en Progenitores originales (PO), Progenitores mejorados o adaptados (PM), cruzas de Tuxpeño original con variedades exóticas (TUXP. OR. x VE), cruzas de Tuxpeño adaptado con variedades exóticas (TUXP. AD. x VE), cruzas de Zacatecas 58 original con variedades exóticas (ZAC58. OR x VE), cruzas de Zacatecas 58 adaptado con variedades exóticas (ZAC58. AD x VE), cruzas de progenitores adaptados con progenitores originales (PA x PO), y grupos de poblaciones.

Para cada variable se calcularon las correlaciones fenotípicas de Pearson, utilizando la función PROC CORR en el programa SAS. La heterosis de las cruzas interraciales se estimó con respecto al progenitor medio (H_{PM}) y al progenitor superior (H_{PS}). Finalmente, se efectuaron contrastes ortogonales entre grupos de cruzas para evaluar las bondades del germoplasma exótico mejorado con respecto al mismo tipo de germoplasma original.

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1 Análisis de varianza y Comparación de medias

Ambientes. El ANAVA de las cruzas de las variedades exóticas: Tuxpeño (Tuxpeño crema 1 y V-520C), Cónico norteño (Zacatecas 58), Nal-tel (Yucatán 7) y Zapalote Chico (Oaxaca 48) en sus versiones original y adaptada (Cuadro 14), detectó diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre Ambientes para las variables RTO y DFM; es decir, la expresión de dichos caracteres fue diferente a través de años, debido a las condiciones climáticas variadas durante el ciclo P-V 2011, destacando heladas tempranas y sequías prolongadas.

Poblaciones. Se detectaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre poblaciones para las tres variables de estudio, lo que muestra que los materiales experimentales tuvieron diferente expresión fenotípica; lo anterior pudo deberse a que se analizaron en conjunto progenitores y cruzas de diferente origen geográfico y racial, con niveles desiguales de mejoramiento genético y de adaptación. Así, la partición de esta fuente de variación en sub-fuentes confirmó diferencias significativas entre los tipos de poblaciones para diversas características agronómicas. Al respecto, hubieron diferencias ($P \leq 0.01$ y 0.05) entre las poblaciones originales y las mejoradas para las tres variables. Entre las cruzas de las variedades de la raza Tuxpeño con VE y en Zacatecas 58 Adaptado x VE, se observaron diferencias únicamente para DFM; mientras que en las cruzas PM x PO hubo significancia estadística para AP y DFM (Cuadro 14). Lo anterior evidenció un comportamiento *per se* diferente entre poblaciones tropicales y templadas para RTO de grano y AP, dependiendo del grado de adaptación que tuvieron.

Poblaciones x Ambientes. Esta interacción resultó altamente significativa ($P \leq 0.01$) sólo para RTO, mientras que en la partición, la interacción de las cruzas Tuxpeño Original x VE fue significativa para DFM, Tuxpeño Adaptado x VE para RTO, y DFM y Zacatecas 58 Adaptado x VE para AP y DFM. Los resultados indican que, en general, los materiales mejorados interaccionaron poco con el ambiente, debido a una mayor frecuencia de genes favorables para adaptación, y por lo tanto el rendimiento amortiguó de alguna manera los efectos adversos del clima y daños de plagas y enfermedades. La variable DFM fue la que resultó más afectada a través de los ambientes, principalmente por efectos adversos del clima y daños causados por plagas y enfermedades.

Los coeficientes de variación resultaron de baja magnitud en dos caracteres, por lo que la confiabilidad de los datos fue aceptable, aunque para rendimiento, el valor de CV estuvo en 28 %, todavía común en experimentos de campo similares al presente.

Cuadro 14. Cuadrados medios del ANAVA combinado del rendimiento de grano (RTO), altura de planta (AP) y número de días a floración masculina (DFM) de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).

F.V.	G.L.	RTO	AP	DFM
Ambientes	1	46.95**	221.33	2436.74**
Repeticiones(ambientes)	4	1.63	304.02	105.89
Poblaciones	24	14.84**	17442.31**	2123.08**
PO	4	4.07*	23961.81**	3247.03**
PM	4	18.88**	17736.05**	1932.92**
TUXP.OR x VE	1	0.35	0.03	3.00*
TUXP.AD x VE	1	0.15	79.05	90.75**
ZAC58.OR x VE	3	0.63	213.37	38.04
ZAC58.AD x VE	3	2.13	193.28	97.67**
P.A. x P.O.	2	6.38	14031.28**	2650.50**
Grupos de poblaciones	6	40.49**	37681.18**	3987.04**
Poblaciones x Ambientes	24	2.80*	426.23	70.64
PO x Ambientes	4	1.10	183.17	50.63
PM x Ambientes	4	5.02	149.42	67.38
(TUXP.OR. x VE) x Ambientes	1	0.27	31.36	3.00*
(TUXP.AD. x VE) x Ambientes	1	11.16**	522.72	60.75**
(ZAC58.OR. x VE) x Ambientes	3	0.12	254.36	265.09
(ZAC58.AD. x VE) x Ambientes	3	1.68	328.79*	34.28**
(P.A. x P.O.) x Ambientes	2	3.41	670.92	6.17
Grupos de Poblaciones x Ambientes	6	3.17	876.60	65.44
Error experimental	94	1.64	351.08	51.87
Total	147			
CV (%)		28	8	8

*,** Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad. RTO ($t\ ha^{-1}$), AP (cm); DFM (días); PO= Progenitores Originales; PM= Progenitores Mejorados; TUXP. OR.= Tuxpeño Original; TUXP. AD.= Tuxpeño Adaptado; ZAC58. OR.= Zacatecas 58 Original; ZAC58. AD.= Zacatecas 58 Adaptado; VE= Variedades exóticas.

Progenitores. Las poblaciones adaptadas pertenecientes a las razas Tuxpeño (Tuxpeño Crema 1 y V-520C) y Cónico Norteño (Zacatecas 58), presentaron en promedio de ambientes el mayor RTO de grano (7.5, 6.2 y 5.6 $t\ ha^{-1}$, respectivamente); por el contrario, en la variable AP Tuxpeño crema 1 Adaptado y V520C Original tuvieron la mayor altura (316 y 304 cm, respectivamente); las poblaciones más tardías fueron el compuesto Tuxpeño Crema 1 Original (116.2 días) y la variedad V520C Original (118.8 días) y Adaptado (114 días). Por su parte, Zacatecas 58 Adaptado tuvo una altura media de 232 cm y una floración masculina media de 77.8 días. Las variedades adaptadas de las razas Nal-tel y Zapalote Chico (Yucatán 7 y Oaxaca 48, respectivamente)

presentaron los rendimientos más bajos, con 4.4 y 2.8 t ha⁻¹, respectivamente, además de presentar una altura de planta baja (200 y 192 cm, respectivamente) y buena precocidad (82.2 y 76.7 días a la antesis) (Cuadro 15). Estos resultados se pueden atribuir a un efecto combinado de la selección natural y artificial en contra de plantas tardías, y en favor de mazorcas con buen aspecto (sanas, grandes, atractivas, uniformes, con características típicas de su raza) provenientes de plantas precoces y vigorosas, en las cuales la altura de la planta es altamente influenciada por el ambiente y modificada por la selección natural (Pérez *et al.*, 2000).

Al comparar las VEO con sus versiones adaptadas (VEA) se observaron cambios fenotípicos en estas últimas, tales como el aumento en RTO, destacando la raza Tuxpeño; la AP se incrementó en las variedades Tuxpeño crema 1, Zacatecas 58, y Oaxaca 48; los DFM disminuyeron en la mayoría de las variedades, excepto en Zacatecas 58, pues sólo aumentó su floración 13.6 días; aun así las razas Cónico Norteño y Zapalote Chico se catalogaron como precoces, Nal-tel como intermedia, y Tuxpeño como tardía, de acuerdo con la clasificación planteada por Pérez *et al.* (2007).

Los resultados anteriores indican que la selección masal visual es un método efectivo para avanzar en la adaptación de variedades exóticas a clima templado, tomándose el aumento en rendimiento y la reducción del ciclo vegetativo como indicadores de la adaptación; por el contrario, en algunas variedades (Tuxpeño, Cónico Norteño y Zapalote Chico) hubo efectos negativos en la AP, ya que presentaron incrementos en el porte de planta. Las variedades V-520C y Yucatán 7 destacaron como de mejor adaptación, en el sentido de que manifestaron un comportamiento favorable en las variables evaluadas, la variedad Zacatecas 58 podría catalogarse como de buena adaptación, ya que su incremento en AP y DFM no modifican drásticamente su comportamiento (sigue siendo una variedad de porte bajo y precoz), lo anterior de acuerdo con Bosch *et al.* (2003), quienes consideran a la selección masal como un método eficaz en la adaptación de germoplasma tropical a clima templado, incluso cuando este es 100% tropical, para caracteres de importancia agronómica como rendimiento, precocidad, altura de planta y otros.

Cruzas. El rendimiento máximo lo obtuvieron las cruzas Tuxp-Crema 1 Adaptado x V-520C (en sus dos versiones) con 7.1 y 7.3 t ha⁻¹, respectivamente; las mismas variedades presentaron

promedio alto de AP y ciclo largo de DFM (312 cm y 107 días en promedio). Enseguida, las cruzas entre Cónico Norteño Adaptado con Nal-tel y Zapalote Chico manifestaron una media aceptable de RTO (6.3 y 5.3 t ha⁻¹, en promedio), AP intermedia (promedio de 227 cm), así como ciclo corto en DFM (promedio de 75.8 días), propiedades atribuidas principalmente a la respuesta heterótica y al comportamiento de los progenitores *per se*. Del grupo de cruzas variedad exótica adaptada por exótica original, destacó la variedad V520C, pues al cruzarse entre si ambas versiones, la craza manifestó una media de rendimiento de grano de 5.1 t ha⁻¹, productividad aceptable para ser una craza proveniente del mismo progenitor.

La cruzas Zacatecas 58 Adaptado por Yucatán 7 (original y adaptado) presentaron el mejor comportamiento agronómico de acuerdo con las tres variables, con un rendimiento de 6.4 y 6.3 t ha⁻¹, respectivamente, entre las que no existió diferencia estadística. La AP fue de 234 y 229 cm, y tuvieron un ciclo a DFM de 81.5 y 75.3 días. En general la mejor respuesta agronómica se obtuvo en cruzas conformadas por ambos progenitores adaptados, y en aquellas donde el primer progenitor fue el adaptado y el segundo original, pues se observaron aumentos en RTO y reducción en el periodo de DFM. Los resultados son indicadores de la existencia de interacciones positivas entre materiales exóticos, las cuales podrían utilizarse en el mejoramiento genético del maíz, pues la exitosa incorporación de germoplasma exótico se reflejará en la creación de nuevas poblaciones mejoradas que exhiban incrementos en rendimiento (Tarter *et al.*, 2003).

Cuadro 15.- Comparación de medias a través de ambientes de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).

TRATAMIENTOS	RTO (t ha ⁻¹)	AP (cm)	DFM (días)
Progenitores			
Tuxp-crema 1 Original (Tuxpeño)	2.4 gh	293 bc	116.2 a
Tuxp-crema 1 Adaptado (Tuxpeño)	7.5 a	316 abc	108.5 ab
V520C Original (Tuxpeño)	2.7 fgh	304 abc	118.8 a
V520C Adaptado (Tuxpeño)	6.2 abcd	287 c	114.0 a
Zac. 58 Original (Cónico Norteño)	2.7 fgh	162 g	64.2 g
Zac. 58 Adaptado (Cónico Norteño)	5.6 abcde	232 de	77.8 efg
Yuc. 7 Original (Nal-tel)	4.2 defgh	212 def	90.2 cde
Yuc. 7 Adaptado (Nal-tel)	4.4 cdefgh	200 defg	82.2 def
Oax. 48 Original (Zapalote Chico)	2.0 h	191 fg	81.7 def
Oax. 48 Adaptado (Zapalote Chico)	2.8 efgh	192 efg	76.7 efg
Cruzas			
Tuxpeño x Tuxpeño			
Tuxp-crema 1 Orig. x V520C Orig.	4.1 defgh	316 abc	115.2 a
Tuxp-crema 1 Adapt. x V520C Adapt.	7.3 ab	331 ab	104.3 abc
Tuxp-crema 1 Orig. x V520C Adapt.	4.4 cdefgh	316 abc	114.2 a
Tuxp-crema 1 Adapt. x V520C Orig.	7.1 abc	293 bc	109.8 ab
Cónico Norteño x Nal-tel			
Zac. 58 Orig. x Yuc. 7 Orig.	4.4 cdefgh	197 defg	78.3 efg
Zac. 58 Adapt. x Yuc. 7 Adapt.	6.3 abcd	229 def	75.3 efg
Zac. 58 Orig. x Yuc. 7 Adapt.	4.3 cdefgh	202 defg	66.7 fg
Zac. 58 Adapt. x Yuc. 7 Orig.	6.4 abcd	234 d	81.5 def
Cónico Norteño x Zapalote Chico			
Zac. 58 Orig. x Oax. 48 Orig.	4.6 bcdefgh	189 fg	72.2 fg
Zac. 58 Adapt. x Oax. 48 Adapt.	5.4 abcdef	220 def	72.0 fg
Zac. 58 Orig. x Oax. 48 Adapt.	3.9 defgh	189 fg	70.8 fg
Zac. 58 Adapt. x Oax. 48 Orig.	5.3 abcdef	226 def	74.5 efg
Exótica Adaptada x Exótica Original			
V520C Adapt. x V520C Orig.	5.1 abcdefg	293 bc	114.2 a
Yuc. 7 Adapt. x Yuc. 7 Orig.	4.2 defgh	206 def	94.7 bcd
Oax. 48 Adapt. x Oax. 48 Orig.	3.0 efgh	213 def	72.2 fg
Medias	4.6	244	89.9

Medias con la misma letra dentro de cada variable son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba Tukey al 0.05.

3.5.2 Análisis por contrastes

La comparación entre los promedios de Progenitores Originales (PO) con los de Progenitores Mejorados (PM) detectó diferencias ($P \leq 0.01$) en la variable RTO (Cuadro 16), lo que indica que los PM superaron en rendimiento a los PO, con una ligera tendencia a ser más altos (13 cm) y precoces (2.3 días).

También existieron diferencias estadísticas para RTO en el segundo y tercer contrastes, y este último también fue significativo en DFM, lo que mostró una mayor productividad de las cruzas formadas por al menos un progenitor adaptado (Tuxpeño y Cónico Norteño). Estos resultados sugieren que las VEA tienen una mayor frecuencia de genes favorables para rendimiento, lo cual es un indicador del efecto favorable que tiene la selección a favor del rendimiento para la adaptación de variedades exóticas, coincidiendo esto con Pérez *et al.* (2002), para quienes la selección masal visual incrementa la frecuencia de alelos favorables en loci que afectan el rendimiento, lo que favorece la adaptación de germoplasma exótico en regiones de clima templado.

Cuadro 16.- Contraste ortogonal de promedios a través de ambientes de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).

CONTRASTES	RTO (t ha ⁻¹)	AP (cm)	DFM (días)
1.- Progenitores Orig. vs. Progenitores Mej.	-2.50**	-13.01	2.37
2.- (TUX. ORI. x VE) vs. (TUXP. ADAPT. x VE)	-2.90**	-17.20	7.58
3.- (ZAC. ORI. x VE) vs. (ZAC. ADAPT. x VE)	-1.60**	-34.43**	-4.30
4.- (TUX. ORI. x VEO) vs. (TUXP. ORI. x VEA)	-0.34	0.10	1.00
5.- (ZAC. ORI. x VEO) vs. (ZAC. ORI. x VEA)	0.46	-6.86	9.51
6.- (TUX. ADAPT. x VEO) vs. (TUXP. ADAPT. x VEA)	-0.23	5.13	5.50
7.- (ZAC. ADAPT. x VEO) vs. (ZAC. ADAPT. x VEA)	0.06	10.72	8.67

*,** Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad. TUXP. ORI.= Tuxpeño Original; TUXP. ADAPT.= Tuxpeño Adaptado; ZAC. ORI.= Zacatecas 58 Original; ZAC. ADAPT.= Zacatecas 58 Adaptado; VE= Variedades Exóticas; VEO= Variedad Exótica Original; VEA= Variedad Exótica Adaptada.

Con objeto de comprobar más detalladamente que las variedades exóticas adaptadas contribuyen con alelos dominantes favorables de adaptación en las cruzas, se hicieron más contrastes ortogonales; para ello se dividieron las poblaciones según su grado de mejoramiento genético (Cuadros 17 y 18).

En el Cuadro 17 se muestra la comparación entre el compuesto exótico Tuxpeño Crema 1 y la variedad V520C con su craza Tuxp. Orig. x V520C Orig.; en éstas se observó que en RTO y AP Tuxpeño Crema 1 presentó mayor promedio que V520C, por lo que se deduce que los genes del compuesto Tuxpeño Crema 1 Original fueron dominantes sobre los genes de V520C Original. En la siguiente comparación (Tuxpeño crema 1 Original y V520C Adaptado), se observó un comportamiento similar, pues la craza Tuxp. Orig. x V520C Adapt. fue más productiva y de mayor porte de planta que ambos progenitores; por lo tanto, la variedad exótica adaptada (V520C) contribuyó con genes favorables dominantes en la F₁. Los resultados anteriores proporcionan evidencia de que el germoplasma exótico adaptado contribuye con alelos que expanden la diversidad genética y desarrollan genotipos con alto rendimiento (Menkir *et al.*, 2006).

Al comparar las variedades exóticas originales Zacatecas 58 y Yucatán 7 con su craza (Zac. 58 Orig. x Yuc.7 Orig.), la variedad Zacatecas 58 Original difirió en AP y DFM, mientras que Yucatán 7 Original solo difirió en DFM. En la comparación de los progenitores Zacatecas 58 Original y Yucatán 7 Adaptado con su craza (Zac. 58 Orig. x Yuc. 7 Adapt.), se observó que la variedad Zacatecas 58 fue superior en RTO y AP, mientras que Yucatán 7 solo lo fue en DFM. Por otro lado, al comparar la craza Zac. 58 Orig. x Oax. 48. Orig. con sus variedades progenitoras, se observó que ambas variedades aportaron genes de productividad a la F₁; en AP solo Zacatecas 58 Original resultó significativo, y en DFM sólo lo fue Oaxaca 48 Original. Al comparar Zac. 58 Orig. x Oax. 48. Adapt., sólo Zacatecas 58 Adaptado resultó superior en AP; es decir, la craza superó el porte de planta manifestado por el progenitor.

Los genes de Zacatecas 58 Original fueron dominantes, en las tres variables evaluadas, sobre los genes de Yucatán 7 (ambas versiones), teniendo ésta última influencia únicamente sobre la variable DFM de la F₁, ya que al comparar el progenitor de la raza Nal-tel con la craza, esta última siempre fue más precoz (Cuadro 17). Por su parte, Zacatecas 58 Original fue superior sobre Oaxaca

48, aunque en la cruza Zac. 58 Orig. x Oax. 48 Orig. ésta última también aportó genes dominantes en la F₁, lo cual pudo deberse a que dicha variedad fue sometida a más ciclos de selección para adaptación (24 ciclos) que el resto de las variedades; por esta razón su grado de adaptación le confiere una mayor dominancia en la F₁; estas características manifestadas por la variedad fueron verificadas en estudios previos por Vargas *et al.* (1982), Sahagún *et al.* (1991), y Coyac *et al.* (2013).

Cuadro 17.- Contraste ortogonal de Progenitores vs Cruzas de variedades exóticas tropicales originales, a través de ambientes, de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).

CONTRASTES	RTO (t ha ⁻¹)	AP (cm)	DFM (días)
Tuxp. Orig. vs. (Tuxp. Orig. x V520C Orig.)	-1.6*	-22.8*	1.0
V520C Orig. vs. (Tuxp. Orig. x V520C Orig.)	-1.3	-12.1	3.6
Tuxp. Orig. vs. (Tuxp. Orig. x V520C Adapt.)	-2.0**	-22.7*	2.0
V520C Adapt. vs. (Tuxp. Orig. x V520C Adapt.)	1.7*	-29.0**	-0.1
Zac. 58 Orig. vs. (Zac. 58 Orig. x Yuc. 7 Orig.)	-1.3	-33.1*	-10.6*
Yuc. 7 Orig. vs. (Zac. 58 Orig. x Yuc. 7 Orig.)	0.1	17.6	15.3**
Zac. 58 Orig. vs. (Zac. 58 Orig. x Yuc. 7 Adapt.)	-1.6*	-40.2**	-2.5
Yuc. 7 Adapt. vs. (Zac. 58 Orig. x Yuc. 7 Adapt.)	0.0	-1.6	15.5**
Zac. 58 Orig. vs. (Zac. 58 Orig. x Oax. 48 Orig.)	-1.9**	-27.6*	-8.0
Oax. 48 Orig. vs. (Zac. 58 Orig. x Oax. 48 Orig.)	-2.6**	1.2	9.5*
Zac. 58 Orig. vs. (Zac. 58 Orig. x Oax. 48 Adapt.)	-1.2	-27.5*	-6.6
Oax. 48 Adapt. vs. (Zac. 58 Orig. x Oax. 48 Adapt.)	-1.0	2.6	5.8

*,** Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad. Tuxp. Orig.= Tuxpeño Original; V520C Orig.= V520C Original; V520C Adapt.= V520C Adaptada; Zac. 58 Orig.= Zacatecas 58 Original; Yuc. 7 Orig.= Yucatán 7 Original; Yuc. 7 Adapt.= Yucatán 7 Adaptada; Oax. 48 Orig.= Oaxaca 48 Original y Oax. 48 Adapt.= Oaxaca 48 Adaptada.

En el Cuadro 18, se observa que en las tres variables evaluadas, el compuesto exótico Tuxpeño Crema 1 Adaptado presentó mayores valores que V520C Original, aunque no fue diferente de la cruza Tuxp. Adapt. x V520C Orig., este comportamiento se fundamenta en el hecho de que los genes de adaptación del compuesto Tuxpeño Crema 1 Adaptado fueron dominantes sobre los genes de inadaptación de la variedad V520C Original. Por otro lado, al comparar Tuxpeño Crema 1 Adaptado y V520C Adaptada con su cruza (Tuxp. Adapt. x V520C Adapt.), nuevamente el compuesto fue superior a V520C Adaptada, aunque esta última difirió de la F₁ en DFM, al resultar

más tardía; esto reafirma la dominancia del compuesto adaptado Tuxpeño Crema 1 sobre V-520C, tal y como se describe en estudios previos realizados por Pérez *et al.* (2000 y 2007), donde la variedad de maíz tropical también mostró una buena adaptación a clima templado debido a efectos favorables por selección masal visual estratificada.

Al comparar la cruza Zac. 58 Adapt. x Yuc. 7 Orig. con sus variedades progenitoras, Zacatecas 58 Adaptada superó a Yucatán 7 Original en RTO, AP y DFM, aunque comparada con la F₁ no fue diferente estadísticamente; el mismo comportamiento lo expresó Zacatecas 58 Adaptada al compararla con su cruza Zac. 58 Adapt. x Yuc. 7 Adapt. En la comparación entre Zacatecas 58 Adaptado y Oaxaca 48 (Original y Adaptada) con las respectivas cruza, la primer variedad fue superior en las variables de RTO y AP.

Se confirmó que la variedad Zacatecas 58 Adaptada contribuyó con genes favorables dominantes en sus cruza con Yuc. 7 y Oax. 48, y que además de los efectos aditivos de los genes de cada progenitor, es muy probable que hayan existido interacciones positivas entre los genes de loci diferentes, dando como resultado las significancias de las diferencias entre promedios de RTO para algunas cruza, confirmando esto lo encontrado por Coyac *et al.* (2013), donde la variedad Zacatecas 58 sometida a selección masal visual aumentó significativamente su rendimiento en comparación con la variedad original.

Cuadro 18. Contraste ortogonal de Progenitores vs Cruzas de variedades exóticas tropicales adaptadas, a través de ambientes, de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).

CONTRASTES	RTO (t ha ⁻¹)	AP (cm)	DFM (días)
Tuxp. Adapt. vs. (Tuxp. Adapt. x V520C Orig.)	0.3	-19.7	-1.3
V520C Orig. vs. (Tuxp. Adapt. x V520C Orig.)	-4.4**	-31.8**	9.0*
Tuxp. Adapt. vs. (Tuxp. Adapt. x V520C Adapt.)	0.1	-14.5	4.1
V520C Adapt. vs. (Tuxp. Adapt. x V520C Adapt.)	-1.1	-43.7**	9.6*
Zac. 58 Adapt. vs. (Zac. 58 Adapt. x Yuc. 7 Orig.)	-0.8	-1.9	-3.6
Yuc. 7 Orig. vs. (Zac. 58 Adapt. x Yuc. 7 Orig.)	-2.2**	-21.4*	8.6*
Zac. 58 Adapt. vs. (Zac. 58 Adapt. x Yuc. 7 Adapt.)	-0.6	2.6	2.5
Yuc. 7 Adapt. vs. (Zac. 58 Adapt. x Yuc. 7 Adapt.)	-1.9*	-28.9**	6.8
Zac. 58 Adapt. vs. (Zac. 58 Adapt. x Oax. 48 Orig.)	0.3	5.5	3.3
Oax. 48 Orig. vs. (Zac. 58 Adapt. x Oax. 48 Orig.)	-3.3**	-35.7**	7.1
Zac. 58 Adapt. vs. (Zac. 58 Adapt. x Oax. 48 Adapt.)	0.2	11.6	5.8
Oax. 48 Adapt. vs. (Zac. 58 Adapt. x Oax. 48 Adapt.)	-2.5**	-28.4**	4.6

*, ** Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad. Tuxp. Adapt.= Tuxpeño Adaptado; V520C Orig.= V520C Original; V520C Adapt.= V520C Adaptado; Zac. 58 Adapt.= Zacatecas 58 Adaptado; Yuc. 7 Orig.= Yucatán 7 Original; Yuc. 7 Adapt.= Yucatán 7 Adaptado; Oax. 48 Orig.= Oaxaca 48 Original y Oax. 48 Adapt.= Oaxaca 48 Adaptado.

En los resultados del Cuadro 19 se compara el promedio de cada tipo de variedad con el promedio de la crusa (VEA x VEO), y se muestra con mayor claridad que los genes relacionados con el RTO de las variedades exóticas adaptadas (VEA) fueron dominantes sobre los genes de inadaptación de las variedades exóticas originales (VEO). Por lo anterior, y para probar tal afirmación, se esperaría que el valor del contraste VEA vs (VEA x VEO) fuera igual a cero o no significativo, y que el valor del contraste VEO vs (VEA x VEO) fuera diferente de cero y significativo. Los resultados en el Cuadro 19 muestran que la predicción se cumple en la variable RTO en referencia con la raza Tuxpeño; sin embargo, la raza Cónico Norteño mostró inconsistencia para dichos contrastes, infiriéndose que el compuesto Tuxpeño Crema 1 superó en comportamiento a Zacatecas 58. Estos resultados coinciden con los de García *et al.* (2002). Esta inconsistencia podría deberse a que las variedades Yucatán 7 y Oaxaca 48 requieren de más ciclos de adaptación para lograr una mejor expresión genética en sus cruzamientos (Cuadro 15). En relación con lo anterior, Pérez *et al.* (2002) encontraron que las variedades derivadas de la raza Nal-tel manifiestan una baja adaptación, mientras que variedades de la raza Zapalote Chico son de

rápida adaptación. Otra causa de dicho comportamiento inconsistente pudo deberse a la presencia de efectos de variación ecológica (Molina, 1992).

Cuadro 19. Contraste ortogonal de Progenitores Exóticos vs Cruzas (VEA x VEO), a través de ambientes de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).

CONTRASTES	RTO (t ha ⁻¹)	AP (cm)	DFM (días)
V520C Adapt. vs. (V520C Adapt. x V520C Orig.)	1.1	-5.9	-0.1
V520C Orig. vs. (V520C Adapt. x V520C Orig.)	-2.4**	11.0	4.6
Yuc. 7 Adapt. vs. (Yuc. 7 Adapt. x Yuc. 7 Orig.)	0.1	-5.3	-12.5**
Yuc. 7 Orig. vs. (Yuc. 7 Adapt. x Yuc. 7 Orig.)	-0.0	6.8	-4.5
Oax. 48 Adapt. vs. (Oax. 48 Adapt. x Oax. 48 Orig.)	-0.1	-21.3*	4.5
Oax. 48 Orig. vs. (Oax. 48 Adapt. x Oax. 48 Orig.)	-1.0	-22.4*	9.5*

*,** Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad. V520C Adapt.= V520C Adaptado; V520C Orig.= V520C Original; Yuc. 7 Adapt.= Yucatán 7 Adaptado; Yuc. 7 Orig.= Yucatán 7 Original; Oax. 48 Adapt.= Oaxaca 48 Adaptado y Oax. 48 Orig.= Oaxaca 48 Original.

3.5.3 Componentes del rendimiento

Se observó que el RTO junto con la mayoría de sus componentes, cambiaron en el mismo sentido y proporción debido al efecto de la selección para adaptación (Cuadro 20), siendo para este grupo de poblaciones la longitud de mazorca (LM), el número de granos por hilera (NGH) y el diámetro de mazorca (DM) los caracteres más representativos del rendimiento de grano; por el contrario, el número de DFM fue el carácter menos representativo. Por lo anterior, se considera al aspecto visual de planta (sanidad, porte, vigor) y características deseables de mazorca (sanas, grandes, atractivas, uniformes, típicas de su raza) como criterios efectivos de selección, los cuales se encuentran estrechamente relacionados con los componentes de rendimiento (Pérez *et al.*, 2000 y 2002). Las variables AP, AM e IPM manifestaron un coeficiente positivo y altamente correlacionado con el rendimiento (0.43, 0.41 y 0.34, respectivamente), lo que indica, que a medida que el rendimiento de grano aumentó, también aumenta la altura de planta y de mazorca; las mismas tendencias fueron encontradas por Rivera *et al.* (1972) y Josephson y Kincer (1977) en sus estudios sobre el efecto de la selección en los caracteres de altura de planta y mazorca.

Cuadro 20. Correlaciones fenotípicas del rendimiento de grano con sus componentes y otras variables en promedio de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclos 2011 y 2012).

Carácter	Coefficiente de correlación de Pearson
Peso de 100 granos (PCG) [†]	0.52**
Volumen de 100 granos (VCG) [†]	0.46**
Longitud de mazorca (LM) [†]	0.81**
Diámetro de mazorca (DM) [†]	0.71**
Número de hileras por mazorca (NHM) [†]	0.54**
Número de granos por hilera (NGH) [†]	0.75**
Días a floración masculina (DFM)	0.16
Altura de la planta (AP)	0.43**
Altura de mazorca (AM) [†]	0.41**
Índice de posición de mazorca (IPM)	0.34**

[†] Caracteres evaluados solo en el ciclo P-V 2012.

En el Cuadro 21 se muestra el comportamiento de las poblaciones con respecto a los componentes del rendimiento altamente correlacionados (Cuadro 20). De los progenitores, se observa una tendencia hacia la mejora de la mayoría de los componentes del rendimiento en las poblaciones seleccionadas (adaptadas), de las cuales sobresalieron el compuesto Tuxpeño Crema 1 y la variedad Zacatecas 58, ya que presentaron promedios altos en la mayoría de las variables, excepto en AM, pues sólo Zacatecas 58 mostró una altura aceptable (133.1 cm); este comportamiento fue consistente con el promedio de RTO, AP y DFM manifestado en el Cuadro 15, donde también se observa que dichas variedades tuvieron una respuesta favorable al proceso de selección. Además de mostrar un alto rendimiento de grano explicado por efectos positivos de sus componentes, las variedades de Tuxpeño también fueron las de mayor porte de planta, en comparación con Zacatecas 58, lo anterior explicado a causa de las distintas procedencias de las variedades, una del trópico húmedo y la otra del norte del país, donde las condiciones ambientales son muy contrastantes; por lo anterior dichas variedades son consideradas como las de mayor potencial y avance genético.

La cruza Tuxp-Crema 1 Adapt. x V520C Adapt. resultó con altos valores en la mayoría de los componentes del rendimiento en comparación con la cruza de la versión original (Tuxp-Crema 1 Orig. x V520C Orig.), excepto en AM y NGH, donde no hubo diferencias significativas entre las cruzas. La cruza con mejor comportamiento en características de mazorca, del grupo de cruzas de Tuxpeño, fue Tuxp-Crema 1 Adapt. x V-520C Orig., ya que se presentó los promedio más altos en PCG (32.5 g), VCG (48.6 ml), DM (5.1 cm), NHM (15.3), y NGH (32). Por otro lado, con respecto a la AM, las cruzas de Tuxpeño tuvieron las plantas más altas, comportamiento indeseable, en comparación con los materiales de las otras razas.

Las cruzas Cónico Norteño x Nal-tel fueron de AM intermedia y no presentaron un comportamiento muy sobresaliente en los componentes de rendimiento; sin embargo, presentaron un rendimiento de grano promedio de 5.3 t ha⁻¹, superior al de las cruzas Cónico Norteño por Zapalote Chico, las cuales presentaron los promedios más bajos AM (99.9 cm), mientras que en AP mantuvieron un comportamiento similar, con 206 cm en promedio (Cuadro 15).

La cruza Zac. 58 Adapt. x Yuc. 7 Adapt. produjo mazorcas grandes y con numerosos granos en comparación con la cruza de versión original, ya que expresó mejor promedio en las variables LM (13.8 cm), DM (4.3 cm), NHM (15.3) y NGH (28.6), en cambio la cruza Zac. 58 Orig. x Yuc. 7 Orig. sólo fue mejor en PCG (30.4 g) y VCG (42.5 ml), lo que se vio reflejado en un bajo rendimiento de grano (4.4 t ha⁻¹).

La cruza Zac. 58 Adapt. x Oax. 48 Orig. mostró altos promedios en las variables PCG (33.3 g), VCG (48.3 ml), LM (12.8 cm), DM (4.4 cm) y NHM (26.3); le siguió la cruza Zac. 58 Adapt. x Oax. 48 Adapt. pues también manifestó un comportamiento sobresaliente en PCG (31.6 g), LM (12.6 cm), DM (4.2 cm), y NGH, lo que las posicionó como las de mejor promedio en rendimiento de grano para el grupo de cruzas de Cónico Norteño x Zapalote Chico, con 5.3 y 5.4 t ha⁻¹, respectivamente.

La variable IPM presentó mucha variación (Cuadro 21), con valores que oscilaron entre 0.79 y 0.42, siendo las poblaciones de menor valor de IPM: Zacatecas 58 original (0.43), Zac. 58 Orig. x Yuc. 7 Adapt (0.43), y Oax. 48 Adapt. x Oax. 48 Orig. (0.42), mientras que Zac. 58 Orig. x Yuc.

7 Orig. presentó el valor más alto (0.79). En la mayoría de las variedades progenitoras se observó una tendencia de IPM dirigido en el mismo sentido que las variables AP y AM; es decir, a medida que aumentó o disminuyó la altura de planta, la altura de mazorca y el IPM también lo hicieron. Así, las versiones adaptadas de Tuxpeño Crema 1 y Zacatecas 58 presentaron aumentos en el porte de planta y altura de mazorca; por el contrario, en V520C y Yucatán 7, a medida que la altura de planta disminuyó, también lo hizo la altura de mazorca. Sólo la variedad Oaxaca 48 adaptada mantuvo su AP mientras disminuyó su AM.

Cuadro 21. Comparación de medias de los componentes de rendimiento y otras variables de 25 poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos. Montecillo, México (ciclo 2012).

TRATAMIENTOS	AM [†]	PCG [†]	VCG [†]	LM [†]	DM [†]	NHM [†]	NGH [†]	IPM
Progenitores								
Tuxp-crema 1 Original (Tuxpeño)	211.0 a	19.9 e	31.0 fg	10.1 defg	3.7 bc	12.6 bcde	22.6 cde	0.71 abcd
Tuxp-crema 1 Adaptado (Tuxpeño)	232.5 a	32.6 ab	49.0 a	14.6 abc	4.9 ab	16.0 a	30.3 abc	0.73 abc
V520C Original (Tuxpeño)	224.4 a	22.6 cde	35.6 abcdefg	8.8 efg	3.8 abc	14.0 abcd	22.3 cde	0.73 abc
V520C Adaptado (Tuxpeño)	196.9 ab	24.7 abcde	34.6 cdefg	13.4 abcd	4.5 ab	14.6 abc	28.6 abc	0.68 abcde
Zac. 58 Original (Cónico Norteño)	69.9 d	26.7 abcde	39.3 abcdefg	11.1 abcdefg	4.1 abc	14.6 abc	24.0 abcde	0.43 g
Zac. 58 Adaptado (Cónico Norteño)	133.1 c	30.9 abc	45.6 abcd	15.1 ab	4.7 ab	16.0 a	29.6 abc	0.57 bcdefg
Yuc. 7 Original (Nal-tel)	139.3 bc	21.5 de	30.0 fg	10.6 cdefg	3.5 bc	12.0 cde	23.3 bcde	0.65 abcde
Yuc. 7 Adaptado (Nal-tel)	122.4 cd	20.8 de	32.6 defg	10.6 cdefg	4.0 abc	14.6 abc	23.3 bcde	0.61 bcdef
Oax. 48 Original (Zapalote Chico)	99.3 cd	21.2 de	32.0 efg	8.4 fg	3.1 c	10.0 e	20.0 de	0.51 efg
Oax. 48 Adaptado (Zapalote Chico)	85.3 cd	24.8 abcde	37.0 abcdefg	7.7 g	3.6 bc	11.3 de	18.3 e	0.43 fg
Cruzas								
Tuxpeño x Tuxpeño								
Tuxp-crema 1 Orig. x V520C Orig.	216.5 a	21.2 de	32.0 efg	13.1 abcd	4.0 abc	12.6 bcde	28.6 abc	0.68 abcde
Tuxp-crema 1 Adapt. x V520C Adapt.	246.4 a	30.8 abc	45.0 abcde	15.3 a	4.9 ab	14.6 abc	30.0 abc	0.74 ab
Tuxp-crema 1 Orig. x V520C Adapt.	218.5 a	20.0 e	29.6 fg	13.0 abcd	4.2 abc	14.6 abc	29.3 abc	0.69 abcde
Tuxp-crema 1 Adapt. x V520C Orig.	231.0 a	32.5 ab	48.6 ab	14.9 ab	5.1 a	15.3 ab	32.0 a	0.68 abcde
Cónico Norteño x Nal-tel								
Zac. 58 Orig. x Yuc. 7 Orig.	194.6 ab	30.4 abc	42.5 abcdef	12.6 abcdef	4.2 abc	13.0 abcde	25.5 abcde	0.79 a
Zac. 58 Adapt. x Yuc. 7 Adapt.	125.0 cd	28.0 abcde	39.6 abcdefg	13.8 abcd	4.3 abc	15.3 ab	28.6 abc	0.54 defg
Zac. 58 Orig. x Yuc. 7 Adapt.	86.8 cd	25.2 abcde	35.6 abcdefg	11.9 abcdefg	4.0 abc	13.3 abcd	26.3 abcde	0.43 g
Zac. 58 Adapt. x Yuc. 7 Orig.	140.8 bc	28.8 abcd	39.6 abcdefg	13.4 abcd	4.1 abc	12.6 bcde	27.3 abcd	0.60 bcdefg
Cónico Norteño x Zapalote Chico								
Zac. 58 Orig. x Oax. 48 Orig.	84.7 cd	29.3 abcd	41.6 abcdefg	11.1 bcdefg	4.1 abc	12.0 cde	24.0 abcde	0.44 fg
Zac. 58 Adapt. x Oax. 48 Adapt.	104.1 cd	31.6 ab	45.6 abcd	12.6 abcdef	4.2 abc	12.0 cde	26.6 abcd	0.47 fg
Zac. 58 Orig. x Oax. 48 Adapt.	83.0 cd	31.8 ab	47.0 abc	11.0 bcdefg	4.2 abc	12.6 bcde	24.0 abcde	0.43 fg
Zac. 58 Adapt. x Oax. 48 Orig.	127.9 cd	33.3 a	48.3 ab	12.8 abcde	4.4 abc	12.6 bcde	26.3 abcde	0.56 cdefg
Exótica Adaptada x Exótica Original								
V520C Adapt. x V520C Orig.	209.8 a	23.9 bcde	35.3 bcdefg	13.6 abcd	4.7 ab	14.6 abc	31.0 ab	0.72 abcd
Yuc. 7 Adapt. x Yuc. 7 Orig.	122.5 cd	20.7 de	28.3 g	10.5 cdefg	3.7 abc	13.3 abcd	23.0 bcde	0.59 bcdefg
Oax. 48 Adapt. x Oax. 48 Orig.	91.4 cd	28.7 abcd	42.3 abcdef	10.3 defg	3.8 abc	10.0 e	22.6 cde	0.42 g
Medias	151.9	26.4	38.6	12.0	4.1	13.4	25.9	0.59

AM= Altura de la mazorca (cm); PCG= Peso de 100 granos (g); VCG= Volumen de 100 granos (ml); LM= Longitud de mazorca (cm); DM= Diámetro de mazorca (cm); NHM= Número de hileras por mazorca, NGH= Número de granos por hilera e IPM= Índice de posición de mazorca. [†] Caracteres evaluados en el ciclo P-V 2012.

3.5.4 Heterosis de las cruzas

Se observaron valores positivos de heterosis con respecto al progenitor medio (H_{PM}) y al progenitor superior (H_{PS}) en algunas cruzas entre las variedades exóticas (Cuadro 22). La máxima expresión de H_{PM} para RTO ocurrió en las cruzas Tuxp-crema 1 Orig. x V520C Orig. y Tuxp-crema 1 Adapt. x V520C Orig. (64 y 39.2 %, respectivamente), de las cuales solo la primera obtuvo 51.9 % de heterosis con respecto al progenitor superior; estos valores fueron superiores a los registrados por García *et al.* (2002) en estudios realizados con cruzas provenientes de Tuxpeño Crema 1 y Zacatecas 58. Las cruzas anteriores presentaron porcentajes de heterosis de baja magnitud, y en algunos casos, negativos en las variables AP y DFM; al respecto, De la Cruz *et al.* (2010) consideran deseable contar con materiales de porte bajo, ya que toleran altas densidades de plantas por hectárea y resisten al acame, sin descuidar la relación positiva de la altura de planta con el potencial de rendimiento de grano. Por otro lado, efectos negativos en DFM representan reducción del ciclo vegetativo en las cruzas, que desde el punto de vista práctico es favorable en algunos casos.

Las cruzas entre Cónico Norteño x Nal-tel tuvieron los valores más bajos de H_{PM} , con una media de 27.2 % para rendimiento, de 7 % para altura de planta, y valores en su mayoría negativos para DFM, lo que representa una mayor precocidad por parte de las cruzas; así mismo, la H_{PS} para este grupo fue de magnitud baja. La craza Zac. 58 Orig. x Oax. 48 Orig. expresó los máximos valores de H_{PM} (100 %) y H_{PS} (70.4 %). En la variable AP, esta craza tuvo 7.4 % de H_{PM} , mientras que en DFM resultó más precoz que el promedio de sus progenitores. Puede decirse que las cruzas entre las razas Cónico Norteño por Zapalote Chico tienen la mayor divergencia genética, pues manifestaron una media de H_{PM} de 51.8 %, con lo que se puede afirmar que entre razas presentan un patrón heterótico potencial para la formación de híbridos de alto rendimiento. Los resultados anteriores sugieren que las cruzas F_1 entre germoplasma templado por tropical exhiben sustancialmente alta heterosis, con las cuales se pueden formar poblaciones base para la obtención de nuevos híbridos (Holland 2004 y Menkir *et al.* 2006).

En las cruzas de Variedades Exóticas Adaptadas x Variedades Exóticas Originales también se observaron manifestación de heterosis, siendo V520C Adapt. x V520C Orig. (15.9 %) y Oax. 48 Adapt. x Oax. 48 Orig. (25 %) las de mayor H_{PM} para RTO, las mismas cruzas en DFM fueron las de mayor precocidad (-1.9 y -8.8 %, respectivamente); en AP solo la primer cruza presentó efectos negativos de H_{PM} , con plantas de porte más bajo. Los resultados anteriores confirman la obtención de alta heterosis en los cruzamientos interracial contrastantes, la cual se podría incrementar mediante la selección de genotipos más adaptables, por un aumento de la frecuencia de genes para adaptación y rendimiento al ambiente de selección (Cervantes y Castillo, 1985; Navas y Cervantes, 1991).

Cuadro 22.- Valores de Heterosis de cruzas intervarietales entre variedades exóticas (originales y adaptadas), promedio de progenitores y F₁ para tres variables en dos ambientes de evaluación.

CRUZAS	RTO				AP				DFM			
	P	F ₁	% H _{PM}	% H _{PS}	P	F ₁	% H _{PM}	% H _{PS}	P	F ₁	% H _{PM}	% H _{PS}
Tuxpeño x Tuxpeño												
Tuxp-crema 1 Orig. x V520C Orig.	2.5	4.1	64.0	51.9	298	316	6.0	3.9	117.5	115.2	-2.0	-3.0
Tuxp-crema 1 Adapt. x V520C Adapt.	6.8	7.3	7.4	-2.7	301	331	10.0	4.7	111.2	104.3	-6.2	-8.5
Tuxp-crema 1 Orig. x V520C Adapt.	4.3	4.4	2.3	-29.0	290	316	9.0	8.0	115.1	114.2	-0.8	-1.7
Tuxp-crema 1 Adapt. x V520C Orig.	5.1	7.1	39.2	-5.3	310	293	-5.5	-7.3	113.6	109.8	-3.3	-7.6
Cónico Norteño x Nal-tel												
Zac. 58 Orig. x Yuc. 7 Orig.	3.4	4.4	29.4	4.8	187	197	5.3	-7.1	77.2	78.3	1.4	-13.2
Zac. 58 Adapt. x Yuc. 7 Adapt.	5.0	6.3	26.0	12.5	216	229	6.0	-1.3	80.0	75.3	-5.9	-8.4
Zac. 58 Orig. x Yuc. 7 Adapt.	3.5	4.3	22.9	-2.3	181	202	11.6	1.0	73.2	66.7	-8.9	-18.9
Zac. 58 Adapt. x Yuc. 7 Orig.	4.9	6.4	30.6	14.3	222	234	5.4	0.9	84.0	81.5	-3.0	-9.6
Cónico Norteño x Zapalote Chico												
Zac. 58 Orig. x Oax. 48 Orig.	2.3	4.6	100.0	70.4	176	189	7.4	-1.2	72.9	72.2	-1.0	-11.6
Zac. 58 Adapt. x Oax. 48 Adapt.	4.2	5.4	28.6	-3.6	212	220	3.8	-5.2	77.2	72.0	-6.7	-7.5
Zac. 58 Orig. x Oax. 48 Adapt.	2.8	3.9	39.3	39.3	177	189	6.8	-1.6	70.4	70.8	0.6	-7.7
Zac. 58 Adapt. x Oax. 48 Orig.	3.8	5.3	39.5	-5.4	211	226	7.1	-2.6	79.7	74.5	-6.5	-8.8
Exótica Adaptada x Exótica Original												
V520C Adapt. x V520C Orig.	4.4	5.1	15.9	-17.7	295	293	-0.7	-3.8	116.4	114.2	-1.9	-3.9
Yuc. 7 Adapt. x Yuc. 7 Orig.	4.3	4.2	-2.3	-4.5	206	206	0.0	-3.0	86.2	94.7	9.9	5.0
Oax. 48 Adapt. x Oax. 48 Orig.	2.4	3.0	25.0	7.1	191	213	11.5	10.9	79.2	72.2	-8.8	-11.6
Promedios	3.9	5.0	31.1	8.6	231	243	5.5	-0.2	90.2	87.7	-2.8	-7.8

P= promedio de los progenitores en t ha⁻¹; F₁= promedio de la crusa en t ha⁻¹; H_{PM}= Heterosis por progenitor medio y H_{PS}= Heterosis por progenitor superior.

3.6 CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados, las variedades exóticas adaptadas aumentaron su rendimiento y por consiguiente sus componentes de rendimiento por efecto de la selección visual de las mejores plantas y mazorcas. Se infiere que este proceso de selección aumentó la frecuencia de genes favorables al carácter y por ende, también se aumentó el grado de adaptación de las mismas. Esto se comprobó al comparar el rendimiento *per se* de los progenitores exóticos adaptados con el de los originales, notándose a las variedades V520C, Yucatán 7 y Zacatecas 58 como de mejor adaptación, de acuerdo con su comportamiento *per se* en las tres variables de evaluación.

Se puede establecer que las variedades exóticas adaptadas pueden manifestar su expresión genética de manera dominante cuando se cruzan con variedades exóticas originales, observándose cambios favorables en las variables de rendimiento y precocidad, aunque la AP tendió a incrementarse; por ello, en cada grupo de cruzamientos se notó una mejor respuesta en aquellas cruzas donde intervinieron progenitores adaptados, y en aquellas donde el primer progenitor era el adaptado y el segundo el original. El rendimiento máximo lo expresaron las cruzas conformadas por las variedades pertenecientes a la raza Tuxpeño Adaptado, aunque presentaron promedios altos de AP y DFM; las cruzas de Cónico Norteño con Nal-tel y Zapalote Chico presentaron los valores más bajos en AP y DFM, aunque fueron menos productivas que las de Tuxpeño.

Las cruzas entre variedades de la raza Tuxpeño y aquéllas entre Cónico Norteño y Zapalote Chico tuvieron una expresión de heterosis alta, lo cual se considera que conforman un patrón heterótico potencial para la formación de híbridos de alto rendimiento. Finalmente, se comprueba la importancia de utilizar germoplasma exótico tropical adaptado para formar nuevas cruzas de maíz la región de los Valles Altos de México.

3.7 LITERATURA CITADA

- Albrecht, B. and J. W. Dudley (1987)** Evaluation of four maize populations containing different proportions of exotic germplasm. *Crop Science*. 27: 480-486.
- Bernardo, R. (2009)** Genomewide selection for rapid introgression of exotic germplasm in maize. *Crop Science*. 49: 419-425.
- Bosch, L., F. Casanas, A. Almirall, E. Sanchez, and F. Nuez. (2003)** Tropical x temperate maize germplasm: Specific recurrent selection for grain yield involving across 8443 La Posta composite. *Maydica*. 48: 313-317.
- Bridges, W. C. and C. O. Gardner (1987)** Foundation populations for adapted by exotic crosses. *Crop Science*. 27: 501-506.
- Brown, W. L. (1953)** Maize of the West Indies. *Tropical Agriculture*. 30: 141-170.
- Cervantes, S. T. y F. Castillo G. (1985)** Comportamiento de cruza F2 interracial de maíz de México evaluadas en ambientes contrastados. *Revista Chapingo*. 47-49:52-58.
- Coyac R., J. L., J. D. Molina G., J. J. García Z. y L. M. Serrano C. (2013)** La selección masal permite aumentar el rendimiento sin agotar la variación genética aditiva en el maíz Zacatecas 58. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 36 (1): 53 – 62.
- De la Cruz L., E., G. Castañón N., N. P. Brito M., A. Gómez V., V. Robledo T. y A. J. Lozano del R. (2010)** Heterosis y aptitud combinatoria de poblaciones de maíz tropical. *Revista Internacional de Botánica Experimental*. 79: 11-17.
- García E (1981)** Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 3a Edición. Instituto de Geografía. UNAM. México, D. F. pp: 252p.
- García Z., J. J., J. López R., J. D. Molina G. y T. Cervantes S. (2002)** Selección masal visual estratificada y de familias de medios hermanos en una cruce intervarietal F2 de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 25(4): 387–391.
- Goodman, M. M. (1985)** Exotic maize germplasm: Status, prospects, and remedies. *Iowa State Journal of Research*. 58: 497-527.
- Hallauer, A. R., and J. B. Miranda Fo. (1988)** *Quantitative Genetics in Maize Breeding*. Second ed. Iowa State University Press, Ames, IA. EUA. 468 p.
- Holland, J. B. (2004)** Breeding: Incorporation of exotic germplasm. In *Encyclopedia of Plant and Crop Science*. Marcel Dekker Eds. Pp: 222-224.

- IICA-BID-PROCIANDINO (1991)** XIII Curso Corto. Mejoramiento Genético del Maíz. Edición: PROCIANDINO. Quito, Ecuador. 180 p.
- Josephson, L. M. y H. C. Kincer (1977)** Selection for lower ear placement in two synthetic populations of maize. *Crop Science*. 17: 499-502
- Menkir, A., Olowolafe M. O., Ingelbrecht I., Fawole I., Badu-Apraku B., and Vroh B. I. (2006)** Assessment of testcross performance and genetic diversity of yellow endosperm maize lines derived from adapted x exotic backcrosses. *Theoretical and Applied Genetics*. 113: 90-99.
- Molina G., J. D. (1992)** Introducción a la Genética de Poblaciones y Cuantitativa. AGT Editor, México. 349 p.
- Navas A., A. A. y T. Cervantes S. (1991)** Selección para rendimiento y adaptación a Valles Altos en cruza interracial tropical de maíz de México. *Agrociencia*. 2(4): 97-113.
- Pérez C., A. A., J. D. Molina G. y A. Martínez G. (2000)** Adaptación a clima templado de una variedad de maíz tropical mediante selección masal visual estratificada. *Agrociencia*. 34: 533-542.
- Pérez C., A. A., J. D. Molina G. y A. Martínez G. (2002)** Adaptación a clima templado de razas tropicales y subtropicales de maíz de México por selección masal visual. Rendimiento, altura de planta y precocidad. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 25(4): 435-441.
- Pérez C., A. A., J. D. Molina G., A. Martínez G., P. García M. y D. Reyes L. (2007)** Selección masal para la adaptación a clima templado de razas tropicales y sub-tropicales de maíz de México. *Bioagro*. 19(3): 133-141.
- Prasanna, B. M. (2012)** Diversity in global maize germplasm: Characterization and utilization. *Journal Bioscience*. 37(5): 843–855.
- Rivera G., J. A., J. D. Molina G. y L. Bucio A. (1972)** Efecto de la selección masal para altura de mazorca sobre otros caracteres en dos variedades de maíz. I. Análisis fenotípico. *Agrociencia*. 8: 29-40.
- SAS Institute. (2003)** SAS/IML Software: Usage and reference. Versión 9.1. Ist. Ed. SAS Institute Inc., Cary, N.C.
- Sahagún C., L., J. D. Molina G., F. Castillo G., y J. Sahagún C. (1991)** Efecto de la selección masal en las varianzas genéticas de la variedad de maíz Zac. 58. *Agrociencia*. 2: 65-79.
- Tarter, J. A., Goodman M. M., and Holland J. B. (2003)** Plant genetic resources. Testcross performance of semiexotic inbred lines derived from Latin American Maize Accessions. *Crop Science*. 43: 2272-2278.

Vargas S., J.E., J. D. Molina G., y T. Cervantes S. (1982) Selección masal y parámetros genéticos en la variedad de maíz Zac. 58. *Agrociencia*. 48: 93-105.

Wellhausen, E. J., L. M. Roberts y E. Hernández X. en Colaboración con P.C. Mangelsdorf. (1951) Razas de Maíz en México. Su origen, características y distribución. Folleto Técnico No. 5. Oficina de Estudios Especiales. Secretaria de Agricultura y Ganadería. México. 237 pp.

Wellhausen, E. J. (1965) Exotic germplasm for improvement of corn belt maize. *In*: 20th Report of Hybrid Corn Industry-Research Conference. Chicago, IL, 8-9 (Sutherland, J. I., ed.). American Seed Trade Association, Washington, DC. pp. 31-45.

IV. DISCUSIÓN GENERAL

4.1 Comportamiento de progenitores

Al comparar las VEO con sus versiones adaptadas (VEA) se observaron cambios agronómicos y morfológicos en estas últimas, ya que presentaron mayor rendimiento y precocidad, por el contrario, la altura de planta aumentó en la mayoría de las variedades. Partiendo del hecho de que son variedades pertenecientes a distintas regiones geográficas, su comportamiento reafirma el supuesto de que la selección masal visual, es un método efectivo para adaptar variedades exóticas, donde los indicadores de la adaptación son el aumento progresivo del rendimiento, mayor sanidad de planta, y reducción del ciclo vegetativo. Con estos cambios se confirma que los materiales mejorados tuvieron una alta frecuencia de genes favorables, lo cual es un reflejo positivo de su adaptación lograda con la selección para rendimiento.

4.1.1 Variedad Local de la raza Chalqueño

En relación con las variedades progenitoras, las versiones del Compuesto Universal (Chalqueño) difirieron entre ellas, pues tuvieron medias altas de rendimiento (5.9 y 6.6 t ha⁻¹, respectivamente), siendo más productiva la versión mejorada; la altura de planta no fue modificada con la selección (301 cm), pues no hubo diferencia estadística entre la versión original y la mejorada; por otro lado, hubo una reducción no significativa en el número de días a floración masculina.

4.1.2 Variedad Exótica de la raza Tabloncillo

La variedad Jalisco 63 tuvo un aumento considerable en su producción de grano, de 3.8 a 6.3 t ha⁻¹, lo que equivale a un 65.7 % de ganancia en rendimiento en 17 ciclos de selección masal; la altura de planta y los días a floración masculina disminuyeron considerablemente en la variedad adaptada, siendo de 59 cm la primera y 23.7 días la segunda; debido a esto dicha variedad podría considerarse como de adaptación alta, ya que mostró un comportamiento agronómico sobresaliente en la mayoría de las variables evaluadas.

4.1.3 Variedad Exótica de la raza Tepecintle

La variedad exótica Chiapas 76 Adaptada fue más productiva, comparada con su versión original, pues su rendimiento aumentó de 2.2 a 4.0 t ha⁻¹, equivalente a 81.8% de ganancia en rendimiento. En la variedad mejorada, la altura de planta fue afectada, pues hubo un aumento en el porte de planta de 45 cm; por otra parte, se obtuvieron reducciones de 0.7 días en la floración masculina.

4.1.4 Variedad Exótica de la raza Comiteco

La variedad Chiapas 39 Original aumentó su rendimiento de 4.0 a 4.9 t ha⁻¹ en la versión adaptada; es decir, se obtuvo una ganancia en rendimiento equivalente a 22.5%. La altura de planta aumentó ligeramente (9 cm) en la versión adaptada, y los días a floración masculina disminuyeron significativamente en 13.9 días.

4.1.5 Variedades Exóticas de la raza Tuxpeño

El compuesto Tuxpeño Crema 1 tuvo un aumento considerable en la variable rendimiento de grano, pues de 2.4 t ha⁻¹ obtenidas en la variedad original, en la versión adaptada se logró llegar a 7.5 t ha⁻¹, lo que equivale a un 212.5 % de ganancia en 12 ciclos de selección masal, lo que evidencia un potencial grande de esta raza en los Valles Altos. En la variable altura de planta se observó poco cambio, pues las plantas adaptadas presentaron incrementos de porte de 23 cm; por el contrario, en DFM la versión adaptada resultó más precoz (7.7 días).

Por otro lado, la variedad V520C Adaptada también fue más productiva que su versión original, pues rindió 6.2 t ha⁻¹, incrementando su rendimiento en 3.5 toneladas. En esta variedad la altura de planta tuvo un comportamiento agronómico deseable, pues las plantas adaptadas disminuyeron su porte en 17 cm. La selección para adaptación en esta variedad no tuvo efectos en DFM, pues no existieron diferencias estadísticas entre la versión original y la adaptada, aunque esta última fue 4.8 días más precoz.

4.1.6 Variedad Exótica de la raza Cónico Norteño

En Zacatecas 58, el rendimiento de grano tuvo cambios positivos con la adaptación, pues la versión adaptada tuvo mayor productividad (5.6 t ha^{-1}) que la versión original (2.7 t ha^{-1}). Por el contrario, la altura de planta y días a floración masculina manifestaron un comportamiento agronómico poco atractivo, pues las plantas adaptadas aumentaron su porte en 70 cm y se hicieron más tardías en 13.6 d.

4.1.7 Variedad Exótica de la raza Nal-tel

La variedad Yucatán 7 tuvo avances poco significativos con la selección, pues la versión adaptada aumentó su rendimiento de grano sólo en 4.7%; la altura de planta y los días a floración masculina disminuyeron parcialmente (12 cm y 8 días, respectivamente); por lo que dicha variedad se considera de baja adaptabilidad.

4.1.8 Variedad Exótica de la raza Zapalote Chico

En comparación con el resto de variedades progenitoras, Oaxaca 48 resultó con los promedios más bajos; además mostró poco avance en rendimiento (0.8 t ha^{-1}) en los 15 ciclos de selección masal a los que ha sido sometida; no se notaron cambios en altura de planta, pues la variedad adaptada aumentó su porte en 1 cm; también resultó más precoz, pues se observó una reducción de 5 días en su ciclo de floración masculina.

4.2 Comportamiento de Cruzas

Existieron interacciones positivas entre las poblaciones seleccionadas para algunas características agronómicas y fenológicas, pues la mayoría de las cruzas expresaron superioridad con respecto a los progenitores *per se*, sobre todo en aquellas donde participaron ambos progenitores mejorados, deduciéndose que éstas contribuyeron con genes favorables de adaptación

dominantes en las F₁, más los posibles efectos epistáticos entre los genes de progenitores genéticamente contrastantes.

4.2.1 Cruzas de Chalqueño por Tabloncillo

Las cruzas de Chalqueño por Tabloncillo en la variable de rendimiento resultaron iguales al promedio general de sus progenitores, con un valor general de 5.7 t ha⁻¹ y 5.6 t ha⁻¹, respectivamente, siendo la excepción la crusa Compuesto Universal Mejorado x Jalisco 63 Adaptado. La H_{PM} de rendimiento para este grupo de cruzas fue de 3.1 %. La crusa con mayor rendimiento fue Compuesto Universal Original x Jalisco 63 Adaptado, con 6.6 t ha⁻¹; el rendimiento promedio de los progenitores de dicha crusa también fue la mejor (6.1 t ha⁻¹).

En altura de planta, las cruzas Compuesto Universal Original x Jalisco 63 Original (298 cm) y Compuesto Universal Mejorado x Jalisco 63 Original (299 cm) tuvieron el mismo porte de sus progenitores (299 cm); el resto de cruzas tuvieron un comportamiento contrario, pues fueron más altas. En DFM, todas las cruzas fueron ligeramente más precoces que la media de sus progenitores, destacando Compuesto Universal Mejorado x Jalisco 63 Adaptado (88.7 días) y Compuesto Universal Mejorado x Jalisco 63 Original (89.2 días). El promedio de días a floración masculina para las cruzas Chalqueño por Tabloncillo fue de 92.8 días.

4.2.2 Cruzas de Chalqueño por Tepecintle

Todas las cruzas de Chalqueño por Tepecintle fueron superiores en rendimiento al promedio de sus progenitores, pues rindieron 6.1 t ha⁻¹, mientras que el promedio de sus progenitores fue de 4.6 t ha⁻¹, y un promedio de H_{PM} de 32.4 %. La crusa con mayor rendimiento fue Compuesto Universal Mejorado x Chiapas 76 Adaptado, con 7 t ha⁻¹; de igual manera, el rendimiento promedio de los progenitores de dicha crusa fue de los más altos (5.3 t ha⁻¹).

La altura de planta en estas cruzas fue muy uniforme, con portes de planta de 305 cm en promedio; se observó que todas las cruzas fueron de mayor porte que la media de sus progenitores (270 cm). La H_{PM} en esta variable fue de 13.2%. Por otro lado, la mayoría de las cruzas fueron

ligeramente más precoces (96.2 días) que la media de sus progenitores (98.2 días), con excepción de Compuesto Universal Original x Chiapas 76 Adaptado (98.5 días). La cruz más precoz fue Compuesto Universal Original x Chiapas 76 Original, con 93 días a floración masculina.

4.2.3 Cruzas de Chalqueño por Comiteco

El rendimiento de grano promedio de las cruzas fue de 6.8 t ha⁻¹ y los progenitores tuvieron un promedio de 5.3 t ha⁻¹. Todas las cruzas de Chalqueño por Comiteco fueron superiores al promedio de sus progenitores; el promedio de H_{PM} en este grupo fue de 28.7%. Las cruzas más productivas fueron Compuesto Universal Original x Chiapas 39 Adaptado, y Compuesto Universal Mejorado x Chiapas 39 Adaptado, con 7.3 y 7.1 t ha⁻¹, respectivamente, entre las que no hubo diferencia estadística; de igual manera, el promedio de sus progenitores también fue alto (5.4 y 5.7 t ha⁻¹).

La altura de planta en estas cruzas fue muy uniforme y sin diferencias significativas, donde el porte de planta promedio fue de 314 cm; se observó que todas las cruzas F₁ fueron más altas que la media de sus progenitores (289 cm). La H_{PM} en esta variable fue de 8.6%. De igual manera, todas las cruzas F₁ fueron ligeramente más precoces que la media de sus progenitores, con un promedio de 101.2 días a FM en la F₁ y de 103 días en progenitores. Las cruzas con mayor precocidad fueron Compuesto Universal Mejorado x Chiapas 39 Adaptado y Compuesto Universal Original x Chiapas 39 Adaptado, con 98.7 y 99 días, respectivamente.

4.2.4 Cruzas de Tuxpeño

En las cruzas pertenecientes a este grupo, la media de rendimiento fue superior (5.7 t ha⁻¹) al expresado por sus progenitores (4.7 t ha⁻¹), observándose valores de H_{PM} positivos (28.2 %). La cruz con mejor promedio de rendimiento fue Tuxpeño Crema 1 Adaptado x V520C Adaptado, con 7.3 t ha⁻¹, mientras que el promedio de sus progenitores también fue alto (6.8 t ha⁻¹).

La Cruz Tuxpeño Crema 1 Adaptado x V520C Original tuvo promedios de AP bajos (293 cm), en comparación con lo expresado por sus progenitores (310 cm), mientras que en el resto de cruzas existieron portes de planta superiores comparadas con sus progenitores, situación reflejada en el

porcentaje de H_{PM} positivo (4.9 %). En DFM, todas las cruzas tuvieron un ciclo menor en comparación con el promedio de sus progenitores (110.9 días en cruzas y 114.4 días en progenitores); en conjunto estas cruzas presentaron periodo de DFM tardíos.

4.2.5 Cruzas de Cónico Norteño por Nal-tel

Todas las cruzas de Cónico Norteño por Nal-tel tuvieron rendimientos superiores al de sus progenitores, pues mostraron en promedio de 5.4 t ha^{-1} , contra 4.2 t ha^{-1} de los progenitores; el promedio de H_{PM} para rendimiento fue de 27.2 %. Las cruzas Zacatecas 58 Adaptado x Yucatán 7 Original y Zacatecas 58 Adaptado x Yucatán 7 Adaptado fueron las de mayor rendimiento de grano (6.4 y 6.3 t ha^{-1} , respectivamente).

Las cruzas tuvieron mayor AP (215 cm) que el promedio de sus progenitores (201 cm); el promedio de H_{PM} en esta variable fue de 7.1 %. En su mayoría, las cruzas F_1 fueron más precoces que el promedio de sus progenitores, con excepción de Zacatecas 58 Original x Yucatán 7 Original, que fue más tardía (78.3 días). La craza con mayor precocidad fue Zacatecas 58 Original x Yucatán 7 Adaptado, con un periodo de 66.7 días a floración masculina.

4.2.6 Cruzas de Cónico Norteño por Zapalote Chico

Todas las cruzas de Cónico Norteño por Zapalote Chico tuvieron rendimientos superiores al de sus progenitores, con promedios de 4.8 t ha^{-1} ; mientras que el de progenitores fue de 3.3 t ha^{-1} ; el promedio de H_{PM} fue de los más altos, con 51.8 %. Las cruzas Zacatecas 58 Adaptado x Oaxaca 48 Adaptado y Zacatecas 58 Adaptado x Oaxaca 48 Original fueron las de mayor rendimiento de grano (5.4 y 5.3 t ha^{-1} , respectivamente), resaltando que esta combinación (Zacatecas 58 Adaptado x Oaxaca 48 Adaptado) tiene gran potencial para generar híbridos intervarietales de alto rendimiento para temporal de Valles Altos.

En AP, todas las cruzas fueron de mayor porte (206 cm) que el promedio de sus progenitores (194 cm); el promedio de H_{PM} en esta variable fue de 6.3 %. En su mayoría, las cruzas F_1 fueron más precoces que el promedio de sus progenitores, con excepción de Zacatecas 58 Original x

Oaxaca 48 Adaptado, que fue más tardía (70.8 días), aunque estadísticamente dicha variable fue de comportamiento muy uniforme. La craza más tardía fue Zacatecas 58 Adaptado x Oaxaca 48 Original (74.5 días); el resto de cruza fueron más precoces, aunque entre ellas no hubo significancia.

4.2.7 Cruzas Variedad Exótica Adaptada x Variedad Exótica Original

El mayor promedio de rendimiento de grano lo tuvo la craza de la raza Comiteco Chiapas 39 Adaptado x Chiapas 39 Original con 7.1 t ha^{-1} , valor muy por encima del presentado por sus progenitores, cuyo promedio fue de 4.4 t ha^{-1} , razón por la cual el valor de H_{PM} también fue el más alto, con 61.4 %. Por otro lado, la craza de la raza Tabloncillo Jalisco 63 Adaptado x Jalisco 63 Original también manifestó un promedio de rendimiento aceptable, con 6.6 t ha^{-1} , además en altura de planta tuvo porte más bajo (247 cm) que el promedio de sus progenitores (267 cm). En cuanto a DFM, las cruza Jalisco 63 Adaptado x Jalisco 63 Original (86.7 días) y Chiapas 76 Adaptado x Chiapas 76 Original (94.2 días) fueron las más precoces con respecto a sus progenitores (Cuadro 11).

En las cruza restantes, la craza de la raza Tuxpeño V520C Adaptada x V520C Original manifestó un buen promedio de rendimiento de grano, con 5.1 t ha^{-1} , mientras que el promedio de sus progenitores fue de 4.4 t ha^{-1} , lo que reflejó un valor de heterosis de 15.9 %. Por otro lado, la misma craza manifestó los promedios más bajos de altura de planta con respecto a sus progenitores (293 cm). En DFM, la craza Oaxaca 48 Adaptado x Oaxaca 48 Original (72.2 días) resultó ser la más precoz, con un periodo de 72.2 días (Cuadro 22).

V. CONCLUSIÓN GENERAL

De acuerdo con los resultados obtenidos del comportamiento *per se* de los progenitores exóticos adaptados comparado con el de los originales, se concluye que las variedades exóticas adaptadas aumentaron su rendimiento por el efecto favorable de la selección de las mejores plantas y mazorcas; este aumento gradual del rendimiento se debió principalmente a cambios agronómicos deseables en los componentes del rendimiento a través de la selección. En las poblaciones tropicales adaptadas a clima templado, el proceso de selección aumentó la frecuencia de genes favorables al rendimiento y la precocidad, y por tanto también se aumentó el grado de adaptación de las mismas; por el contrario, la altura de planta fue poco favorecida, pues ésta se incrementó a través del proceso de adaptación. Las poblaciones que mostraron un mayor grado de adaptación y de efectos agronómicos favorables fueron: Jalisco 63, V520C y Yucatán 7, pues tuvieron aumentos en el rendimiento, disminución de la altura de planta y reducción del ciclo de días a floración masculina.

Los cruzamientos entre progenitores contrastantes permitieron evidenciar que las variedades exóticas adaptadas manifestaron su expresión genética de manera dominante cuando se cruzaron con variedades exóticas originales o variedades locales con poco mejoramiento, pues en su mayoría se observaron aumentos en la productividad en las cruza F_1 y reducción del ciclo de días a floración masculina, aunque la altura de planta mostró incrementos, especialmente en aquellas cruza donde intervino al menos un progenitor seleccionado (adaptado) o ambos. Se comprobó la hipótesis propuesta de que los genes de adaptación son dominantes sobre los genes de inadaptación, al comparar el promedio de rendimiento de la variedad exótica original con el de la cruza variedad exótica adaptada x variedad exótica original, donde se verificó que el valor del contraste respectivo fue diferente de cero y significativo, en favor de la cruza donde participó la variedad adaptada.

El rendimiento máximo lo expresaron las cruza Chalqueño x Comiteco, Chalqueño x Tepecintle, Tuxpeño x Tuxpeño (Tuxpeño-Crema 1 Adaptado x V520C Adaptado), Compuesto Universal Original x Chiapas 39 Adaptado, Compuesto Universal Mejorado x Chiapas 39 Adaptado, Chiapas 39 Adaptado x Chiapas 39 Original, Tuxpeño-Crema 1 Adaptado x V520C

Original, y Compuesto Universal Mejorado x Chiapas 76 Adaptado; las cruzas tuvieron rendimientos superiores a las 7 toneladas por hectárea, aunque presentaron promedios relativamente altos de AP y un ciclo largo en DFM. Por otro lado, únicamente las cruzas Chalqueño x Tepecintle, Cónico Norteño por Zapalote Chico y por Tuxpeño tuvieron una expresión alta de heterosis con respecto al progenitor medio. Con estas variedades se podrían formar patrones heteróticos para la formación de híbridos de alto rendimiento. Finalmente, se comprueba la importancia de utilizar germoplasma exótico tropical adaptado para formar nuevas cruzas de maíz con alelos de interés para la región de los Valles Altos de México.