



VARIETADES COMPUESTAS, UNA OPCIÓN DE APROVECHAMIENTO DE LA DIVERSIDAD DE LAS POBLACIONES NATIVAS DE MAÍZ

COMPOSITE VARIETIES, AN OPTION FOR USING THE DIVERSITY OF MAIZE LANDRACES

Gonzalo Del Carmen-Bravo¹, Abel Gil-Muñoz^{1*}, Pedro Antonio López¹, Delfino Reyes-López² e Ignacio Ocampo-Fletes¹

¹Colegio de Postgraduados, Campus Puebla, Santiago Momoxpan, Puebla, México. ²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad en Ciencias Agrícolas y Pecuarias, San Juan Acateno, Puebla, México.

*Autor de correspondencia (gila@colpos.mx)

RESUMEN

Las poblaciones nativas de maíz (*Zea mays* L.) han sido fuentes muy valiosas de genes para los programas de fitomejoramiento, pero los esfuerzos orientados a su mejoramiento en las microrregiones donde se originaron han sido escasos. Una propuesta es la formación de variedades compuestas; sin embargo, no existen estudios que documenten su potencial, especialmente cuando el material base son poblaciones nativas sobresalientes. Por lo anterior, los objetivos de esta investigación fueron evaluar el comportamiento agronómico y rendimiento de grano de tres variedades compuestas con respecto a sus progenitores y testigos comerciales y, a partir de ello, valorar la viabilidad de este tipo de materiales. Se diseñaron tres experimentos, uno con variedades de grano blanco, otro de grano amarillo y otro de grano azul. Cada uno incluyó tres ciclos de recombinación de la variedad compuesta correspondiente, las poblaciones nativas progenitoras y al menos dos testigos. Los materiales en cada experimento se evaluaron bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, en tres localidades de la microrregión de procedencia de las poblaciones progenitoras. Se registraron días a floración femenina, altura de mazorca, porcentajes de acame de tallo y de raíz, rendimiento de grano y varios de sus componentes. Se aplicó un análisis de varianza combinado a través de localidades y prueba de medias. Las variedades compuestas mantuvieron y conjuntaron atributos favorables de las poblaciones progenitoras y las superaron en rendimiento, con ganancias de entre 1.8 y 10.6 % (promedio de los ciclos de recombinación) y mostraron una menor afectación de la producción de grano a través de ambientes; adicionalmente, las variedades compuestas igualaron o superaron en rendimiento a los testigos. Se concluye que la formación de variedades compuestas a partir de poblaciones nativas sobresalientes representa una opción adecuada de aprovechamiento de los maíces nativos en programas de fitomejoramiento microrregional.

Palabras clave: *Zea mays* L., comportamiento agronómico, compuesto varietal, poblaciones nativas.

SUMMARY

Maize (*Zea mays* L.) landraces have been very valuable sources of genes for breeding programs; nevertheless, efforts aimed at their improvement in the microrregions where they originated have been scarce. One proposal is the formation of composite varieties; however, there are no studies documenting their potential, especially when the base material consists of outstanding

landraces. Thus, the objectives of this study were to evaluate the agronomic performance and grain yield of three composite varieties compared to their parents and commercial controls and based on that, to assess the viability of this type of material. Three experiments were designed, one with white grain varieties, other with yellow grain varieties and another with blue grain varieties, each included three recombination cycles of the corresponding composite variety, the parental landraces and at least two controls. Materials of each experiment were evaluated under a randomized complete block design with three replications in three localities of the microregion of origin of the landraces. Days to silking, ear height, stalk and root lodging percentages, grain yield and several of their components were recorded. Combined analysis of variance across localities and mean comparison test were applied. Composite varieties maintained and combined favorable traits of the parent populations and surpassed them in yield, with gains between 1.8 and 10.6 % (average across recombination cycles), and showed less affectation in grain yield across environments; in addition, composite varieties equaled or exceeded the yields of the controls. It is concluded that the formation of composite varieties from outstanding landraces represents an adequate option for landrace utilization in microregional breeding programs.

Index words: *Zea mays* L., agronomic performance, composite population, landraces.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, en México se reconoce la existencia de 64 razas de maíz (*Zea mays* L.), de las cuales 59 se consideran nativas (Sánchez *et al.*, 2000). Contenidas en esas razas existe una gran cantidad de poblaciones nativas, cuyo número potencial podría ser de entre cuatro y seis millones (Gil, 2011), formando un continuo de diversidad, y aunque presentan ciertas características en común, son diferentes entre sí (Muñoz, 2005). A pesar de la existencia de esta enorme riqueza genética, el uso de la misma en el fitomejoramiento del maíz se ha restringido al empleo de unas cuantas razas, siendo Chalqueño, Cónico, Celaya, Cónico Norteño y Tuxpeño las más utilizadas (Márquez-Sánchez, 2008), y aun en estos casos, sólo se han considerado algunas poblaciones, evidenciando

que el germoplasma nativo de maíz ha sido utilizado de manera muy limitada (Carvalho *et al.*, 2004; González *et al.*, 2014; Ramírez-Díaz *et al.*, 2015), demostrando también que se ha hecho poco mejoramiento de las poblaciones nativas *per se*, a pesar de que en estos materiales existen caracteres y alelos favorables y novedosos (Gómez *et al.*, 2017; Ramírez-Díaz *et al.*, 2015).

Existen diversas propuestas orientadas al mejoramiento de las poblaciones nativas, como la selección masal visual estratificada (Molina, 1983), el esquema de retrocruza limitada (Márquez *et al.*, 2000) y el mejoramiento genético en los nichos ecológicos (Muñoz, 2005); este último se aplica a escala microrregional, colectando y evaluando las poblaciones nativas ahí sembradas, para seleccionar las sobresalientes dentro de cada componente del patrón varietal, las cuales se propone emplear en la formación de variedades compuestas (Muñoz, 2005).

De acuerdo con Márquez-Sánchez (1992b), una variedad compuesta (o compuesto varietal) de maíz es la segunda generación obtenida por apareamiento aleatorio de las plantas de un compuesto balanceado de semillas, hecho con poblaciones o variedades no endogámicas y no relacionadas. Este tipo de materiales normalmente se emplea como poblaciones base en programas de selección recurrente y en bancos de germoplasma (Hallauer y Miranda, 1998; Márquez-Sánchez, 2014), aunque se ha mencionado que también pueden emplearse como variedades mejoradas (Márquez-Sánchez, 1992b), aprovechándose como variedades de polinización libre. Camarena *et al.* (2014) precisan que se espera que el rendimiento promedio de la variedad compuesta sea mayor que el promedio de las variedades progenitoras.

Aun cuando se ha señalado que las variedades compuestas pueden emplearse como variedades mejoradas (Márquez-Sánchez, 1992b; Márquez-Sánchez y Sahagún-Castellanos, 2002), no se encontraron reportes que documentaran el potencial de tales materiales, particularmente cuando se forman a partir de poblaciones nativas sobresalientes. Por lo anterior, se realizó la presente investigación, cuyos objetivos fueron evaluar el comportamiento y rendimiento agronómico de tres variedades compuestas con respecto a sus progenitores y algunos testigos comerciales y, a partir de ello, valorar el potencial genético de este tipo de materiales en el mejoramiento genético del maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área del estudio

La investigación se condujo en la microrregión

Libres-Huamantla-Mazapiltepec (LHM), ubicada en el altiplano occidental de Puebla y oriental de Tlaxcala, a una altitud promedio de 2458 msnm (Alvarado-Beltrán *et al.*, 2019). Sus coordenadas extremas son 19° 04' y 19° 43' LN y 97° 20' y 98° 02' LO; abarca una superficie total de 2374.15 km² y en ella predomina el clima templado subhúmedo con lluvias en verano (INEGI, 2020). El área se caracteriza por la presencia de heladas, sequías y suelos poco fértiles (Muñoz-Tlahuiz *et al.*, 2013).

Los experimentos se establecieron en tres localidades: Ocotepc (19° 33' 19" LN, 97° 38' 56" LO, 2483 msnm), Máximo Serdán (19° 15' 46" LN, 97° 49' 42" LO, 2394 msnm) y Soltepec (19° 07' 13" LN, 97° 42' 47" LO, 2437 msnm).

Material genético

Se evaluaron tres conjuntos de variedades, correspondientes a los principales grupos de coloración (blanco, amarillo y azul) detectados por Alvarado-Beltrán *et al.* (2019) en la microrregión Libres-Huamantla-Mazapiltepec. Cada conjunto estuvo integrado por 10 materiales: cinco poblaciones nativas sobresalientes (progenitoras de las variedades compuestas), seleccionadas previamente con base en la metodología de mejoramiento genético en los nichos ecológicos (Muñoz, 2005), tres ciclos de recombinación (ciclos 1, 2 y 3, tratándose de las variedades compuestas de grano blanco y amarillo) y dos variedades testigo (Cuadro 1). Sólo en los maíces de grano azul se utilizaron dos ciclos de recombinación (ciclos 3 y 4) de la variedad compuesta y tres testigos.

Diseño y unidad experimental

Cada conjunto de variedades se evaluó bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental consistió de tres surcos de 5.00 m de largo y 0.85 m de ancho. En cada surco se sembraron 11 matas cada 0.50 m; cada mata con tres semillas para posteriormente dejar dos plantas.

Manejo de los experimentos

Los experimentos se sembraron los días 22 de abril (Ocotepc), 26 de abril (Máximo Serdán) y 2 de mayo (Soltepec) de 2019. El manejo agronómico fue el acostumbrado por el agricultor, excepto por la fertilización y el control de malezas. Se aplicó la dosis 150N-50P-00K (1/3 del nitrógeno y todo el fósforo en la primera labor y el nitrógeno restante en la segunda labor) y, después de la segunda labor, se aplicó la mezcla de herbicidas dicamba + 2,4-D y atrazina a una dosis de 1 L ha⁻¹ de cada uno.

Cuadro 1. Material genético de maíz estudiado en cada grupo de coloración. Microrregión Libres-Huamantla-Mazapiltepec, Puebla y Tlaxcala, 2019.

Coloración de grano	Material genético									
	Poblaciones nativas					Variedades compuestas [†]			Testigos	
Blanco	CP088	CP131	CP144	CP186	CP198	VC1B	VC2B	VC3B	S. Serdán	H-48
Amarillo	CP113	CP118	CP163	CP316	CP356	VC1A	VC2A	VC3A	V-55A	Cirrus®
Azul	CP089	CP147	CP166	CP184	CP197	VC3Z	VC4Z		VS-09	H-14T, H-12

[†]VC: variedad compuesta, el número indica el ciclo de recombinación, B: blanco, A: amarillo, Z: azul.

Todos los experimentos se desarrollaron en seco. Las cosechas fueron el 11 y 22 de noviembre en Ocotepéc y Máximo Serdán, respectivamente, y el 4 de diciembre en Soltepec.

Variabes evaluadas

Se midieron las siguientes variables: a) caracteres fenológicos y vegetativos: días al 50 % de floración femenina (DFF) y altura de mazorca (ALM) en cm; b) caracteres agronómicos: porcentaje de plantas con acame de raíz (PACR) y tallo (PACT), factor de desgrane (FACT) y rendimiento de grano (REND) en kg ha⁻¹; c) caracteres de mazorca y grano: longitud (LGM) en cm, diámetro (DMZ) en cm y número de hileras (NHIL) de la mazorca, número de granos por hilera (NGH) y peso hectolítrico (PHE).

Con base en lo reportado por Alvarado-Beltrán *et al.* (2019), los días al 50 % de floración femenina se registraron por unidad experimental, en tanto que la altura de mazorca se midió en cinco plantas de cada parcela. Los porcentajes de acame se valoraron según lo indica CIMMYT (1985), tomando como unidad de medición la parcela completa. El factor de desgrane y el rendimiento de grano (ajustado al 14 % de humedad) se midieron de acuerdo con lo expuesto por Alvarado-Beltrán *et al.* (2019), en tanto que las variables de mazorca se cuantificaron como detallan Rocandio-Rodríguez *et al.* (2014). El peso hectolítrico se obtuvo por extrapolación, a partir del peso de un volumen constante de 250 mL de grano.

Análisis estadístico

En cada grupo de coloración, los datos de las variables se sometieron a un análisis de varianza combinado y, donde procedió, a una prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) en el programa SAS University® (SAS Institute, 2020). En el caso de los porcentajes de acame, previo a su análisis, se transformaron con la función raíz cuadrada (Steel y Torrie, 1985). Con base en Sánchez-Domínguez *et al.* (2006), se construyó un cuadro de promedios por

cada variedad, en el cual para cada variable se identificó el grupo estadísticamente superior por la prueba de Tukey, para posteriormente contabilizar el número de caracteres favorables de cada variedad. Según las recomendaciones de Muñoz (2005), para cada grupo de coloración se graficó el rendimiento obtenido por cada material a través de localidades para valorar su comportamiento.

RESULTADOS

Los cuadrados medios del análisis de varianza para los tres grupos de coloración de grano (Cuadro 2) indican que entre localidades hubo diferencias significativas para la mayoría de las variables estudiadas: 64 % en los maíces de grano blanco, 82 % en los amarillos y 91 % en los azules, lo cual es un indicativo de que al interior de la zona de estudio existió variación ambiental. En Máximo Serdán, la floración ocurrió antes (99, 90 y 92 días para maíces blancos, amarillos y azules, respectivamente) que en los otros sitios. En Ocotepéc y Máximo Serdán, en general, se registraron menores alturas de mazorca (≤ 168.7 cm), porcentajes de acame de raíz (≤ 6.5 %) y de tallo (≤ 15.8 %) en comparación con Soltepec. En las dos primeras localidades también se tuvieron los mayores rendimientos de grano (≥ 8.5 t ha⁻¹) para los tres grupos de coloración, los más altos factores de desgrane (≥ 0.90) en maíces blancos y azules, y las mazorcas de mayor longitud (≥ 15.2 cm), diámetro (≥ 46.2 mm) y número de granos por hilera (≥ 30.1) en maíces amarillos.

Entre materiales, la mayor proporción de diferencias estadísticas se encontró en los grupos de grano blanco (54.5 %) y azul (100 %), no así en el amarillo (9 %), ello indica que en los dos primeros grupos existió un mayor nivel de diferenciación fenotípica entre variedades y que el de grano amarillo resultó ser un grupo más homogéneo en cuanto al conjunto de variables medidas.

En los maíces de grano blanco y azul, la interacción localidad \times material resultó no significativa en nueve de las 11 variables, implicando que su nivel de expresión

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables estudiadas en diez materiales de maíz evaluados de cada uno de tres grupos de coloración de grano. Microrregión Libres-Huamantla-Mazapiltepec, Puebla y Tlaxcala, 2019.

Var	Grano blanco			Grano amarillo			Grano azul					
	Loc	Mat	LocxMat	Loc	Mat	LocxMat	Loc	Mat	LocxMat	Error		
DFE	214.7**	81.1**	4.1ns	4.6	513.7**	60.8*	17.6ns	13.6	520.9**	133.2**	8.6*	4.1
ALM	8531.9**	3279.3**	97.7ns	119.9	5590.1**	2082.1ns	987.6**	394.5	9455.8**	1163.9**	59.8ns	128.6
PACR	5.5**	6.5**	0.4ns	0.5	1.1ns	3.2ns	0.2ns	1.1	5.5**	3.1**	0.4ns	0.6
PACT	0.2ns	4.6**	0.5ns	0.9	41.6**	1.2ns	2.1**	0.9	32.3**	5.1**	0.8ns	0.7
LGM	4.2*	1.4ns	0.9ns	1.1	7.3**	3.3ns	2.2*	1.1	2.0ns	3.0**	0.7ns	0.8
DMZ	1.4ns	9.7ns	7.3ns	7.2	51.4**	10.3ns	12.3**	3.6	13.7*	23.1**	6.1ns	3.7
NHIL	7.9**	0.9ns	0.6ns	0.7	9.1**	0.7ns	0.6ns	0.6	12.8**	6.0**	1.1ns	1.4
NGH	7.9ns	11.1ns	6.4*	3.1	77.0**	7.3ns	7.3ns	6.1	10.7*	18.7**	3.1ns	3.4
PHE	0.3ns	10.3**	0.8ns	3.2	106.4**	5.5ns	7.3**	2.8	27.4**	106.8**	5.3ns	3.2
FACT	0.0004*	0.002**	0.0001ns	0.0001	0.001ns	0.002ns	0.001**	0.0004	0.0002*	0.002**	0.0001ns	0.0001
REND	7.6E+07**	1.96E+06ns	2.4E+05*	1.1E+06	9.4E+07**	2.0E+06ns	2.9E+06ns	1.6E+06	2.4E+07**	3.8E+06*	1.3E+06*	6.0E+05

Var: variable; DFE: días al 50 % de floración femenina; ALM: altura de mazorca; PACR: porcentaje de plantas con acame de raíz; PACT: porcentaje de plantas con acame de tallo; LGM: longitud de mazorca; DMZ: diámetro de mazorca; NHIL: número de hileras de la mazorca; NGH: número de granos por hilera; PHE: peso hectolítrico; FACT: factor de desgrane; REND: rendimiento de grano; Loc: localidad; Mat: material; LocxMat: localidad x material; *, P ≤ 0.05, **, P ≤ 0.01, ns: no significativo.

en cada material fue constante a través de ambientes. Rendimiento de grano fue una de las variables que en estos dos grupos mostró interacción. En maíces amarillos hubo significancia para la interacción en 54.5 % de las variables, implicando menor estabilidad en el nivel de expresión de esos atributos a través de ambientes.

El Cuadro 3 muestra el comportamiento agronómico de las variedades en cada grupo de coloración de grano. En maíces blancos, cuatro de las poblaciones progenitoras sobresalieron en una o dos de las características evaluadas, coincidieron mayormente en peso hectolítrico y otras en factor de desgrane. El promedio del número de características favorables (NCF) de las poblaciones progenitoras fue de 1.0; el de las variedades compuestas fue ligeramente superior. Resalta que las variedades compuestas mantuvieron los altos factores de desgrane presentes en los progenitores y el mismo nivel de expresión de días a floración femenina, altura de mazorca, porcentajes de acame y características de mazorca, lo cual es importante para los agricultores; ésto indica que las variedades compuestas (VC) preservaron los atributos presentes en el conjunto de poblaciones progenitoras (PP). El ciclo más avanzado de recombinación (VC3B) mantuvo el nivel de expresión de la VC2B en 91 % de las características, excepto en peso hectolítrico, aunque con un valor muy próximo en este último. El promedio de rendimiento de grano de las VC (9584 kg ha⁻¹) fue ligeramente superior al de las PP (9406.8 kg ha⁻¹).

En maíces blancos, al comparar las VC contra los testigos, se observó que el híbrido tuvo un mayor NCF: fue más precoz, de menor altura y presentó menor acame de raíz y tallo. Estos son atributos a mejorar en las VC, pues si bien éstas tuvieron rendimientos de grano numéricamente mayores al del híbrido (la VC3B lo superó en 931 kg), se vieron superadas en las otras características ya mencionadas. El NCF y el rendimiento de las variedades compuestas fueron muy similares al de la variedad de polinización libre Sintético Serdán, también derivada de poblaciones nativas sobresalientes.

En maíces de grano amarillo, la única característica en la que hubo variación fue días a floración femenina (Cuadro 3). De las PP, dos fueron precoces, característica que se mantuvo en las VC más avanzadas. Para el resto de atributos, la homogeneidad presente entre las cinco PP se mantuvo en las VC. Aun cuando no existieron diferencias estadísticas en rendimiento de grano, en términos agronómicos, las variedades compuestas tuvieron una ganancia de 3.2 % respecto a las poblaciones progenitoras. Los testigos fueron estadísticamente iguales en todas las características y tuvieron el mismo NCF que las variedades compuestas; sin embargo, éstas presentaron

valores numéricamente superiores en factor de desgrane y rendimiento de grano. En este último, las variedades compuestas superaron en promedio en 19 y 6 % a la variedad de polinización libre y al híbrido, respectivamente.

El conjunto de maíces azules mostró mayor variación y NCF que los dos conjuntos anteriores. En las poblaciones progenitoras, el NCF fluctuó entre 5 y 9; presentaron bajos porcentajes de acame de tallo, mazorcas anchas, con más de 14 hileras y factores de desgrane ≥ 0.90 . Como subgrupo, el promedio de NCF en las poblaciones progenitoras fue de 6.2. Las VC de este grupo cuentan con tres y cuatro ciclos de recombinación (uno más que las de los otros conjuntos) y se caracterizaron por integrar atributos favorables dispersos entre las PP, situación que se reflejó en el mayor promedio de NCF en las VC; adicionalmente, las VC tuvieron alturas de mazorca muy próximas al promedio presente en las PP, y pesos hectolítricos ligeramente mayores a los de las PP. Este comportamiento sugiere que las variedades compuestas (particularmente la VC4Z) conjuntaron y mantuvieron características presentes en las poblaciones progenitoras, seleccionadas precisamente por su adecuado comportamiento agronómico. En cuanto a rendimiento de grano, el promedio de las VC fue 10.6 % más alto que el de las PP.

Los testigos en este grupo fueron competitivos, particularmente los híbridos y en específico el H-12; no obstante, las variedades compuestas presentaron un NCF igual o mayor al de aquellos, sobresaliendo en características como precocidad, mazorca más ancha y un alto factor de desgrane. En rendimiento de grano, las variedades compuestas igualaron a los híbridos y superaron a la variedad de polinización libre.

En la Figura 1 se muestra el rendimiento de grano de los materiales de cada grupo a través de localidades. Ocotepc y Máximo Serdán fueron los mejores ambientes, con rendimientos de 9540 y 9249 kg ha⁻¹, respectivamente (promedio de los tres grupos de coloración), superando estadísticamente al obtenido en Soltepec (6949 kg ha⁻¹). Analizando el comportamiento de los materiales de grano blanco (Figura 1A) se observa que las variedades compuestas, particularmente VC1B y VC3B, mantuvieron los rendimientos altos y constantes mostrados por tres de las poblaciones progenitoras en los ambientes más favorables y, al igual que ellas, los disminuyeron al pasar al ambiente más restrictivo. Esta respuesta contrasta con la observada en las otras dos poblaciones progenitoras, particularmente la CP88, la cual, aun cuando alcanzó el máximo rendimiento en Ocotepc, lo redujo de forma continua en la medida en que los ambientes fueron menos favorables. Porcentualmente, las VC disminuyeron menos su rendimiento al pasar de Ocotepc a Soltepec (25, 25

Cuadro 3. Comportamiento agronómico de los diez materiales de maíz evaluados en cada uno de tres grupos de coloración de grano. Promedio de ambientes. Microrregión Libres-Huamantla-Mazapiltepec, Puebla y Tlaxcala, 2019.

	DFE (días)	ALM (cm)	PACR (√%)	PACT (√%)	LGM (cm)	DMZ (mm)	NHIL (Núm)	NGH (Núm)	PHE (kg hL ⁻¹)	FACT	REND (kg ha ⁻¹)	NCF
Maíces de grano blanco												
CP088	107.0	179.0	2.9	2.9	14.8	50.9	15.7	28.3	69.1	0.91a	9530	1
CP131	101.0	168.1	2.2	3.5	15.2	49.4	15.5	28.1	71.8a	0.90	8633	1
CP144	99.3	170.0	2.6	3.5	15.8	51.4	15.7	30.8	71.0a	0.91a	9544	2
CP186	101.6	177.6	2.2	3.3	15.3	52.7	15.9	28.6	69.6	0.89	9723	0
CP198	100.1	163.4	1.4	2.7	15.3	50.9	14.9	29.5	71.3a	0.89	9604	1
VC1B	100.6	160.0	2.3	3.4	15.9	52.3	15.5	30.9	70.0a	0.91a	9093	2
VC2B	100.3	171.8	2.4	2.8	15.6	51.6	15.4	30.6	70.2a	0.91a	10095	2
VC3B	101.0	172.5	2.6	3.5	15.7	52.2	15.3	29.7	69.8	0.91a	9564	1
S.S.	98.8	168.0	1.9	3.3	15.9	51.1	15.4	31.0	70.7a	0.91a	9765	2
H48	94.8a	112.5a	0.0a	1.1a	15.9	50.0	16.0	30.3	72.5a	0.87	8633	5
DMS	3.34	17.0	1.0	1.5	1.6	4.1	1.2	2.7	2.7	0.01	1660	
Maíces de grano amarillo												
CP113	93.1a	133.5	1.2	3.8	14.2	44.7	13.4	28.1	73.3	0.90	7200	1
CP118	98.4	148.6	2.6	3.5	14.9	46.3	13.7	28.8	73.3	0.91	8245	0
CP163	98.6	149.2	2.3	4.0	14.8	45.5	13.6	28.1	73.0	0.89	7384	0
CP316	94.2a	131.2	1.1	3.5	15.1	46.0	13.3	29.7	74.0	0.90	7851	1
CP356	97.1	144.2	1.6	3.4	14.9	44.9	13.7	28.9	72.9	0.90	7830	0
VC1A	96.3	130.6	2.0	3.4	15.3	45.8	14.0	29.6	73.3	0.90	8076	0
VC2A	95.0a	144.5	1.8	3.8	15.0	45.9	13.7	29.4	73.9	0.89	7867	1
Maíces de grano amarillo												
VC3A	94.2a	142.6	2.1	3.6	14.8	45.1	13.2	29.1	73.0	0.91	7908	1
V55A	90.2a	105.8	1.2	2.9	15.0	43.0	14.0	30.4	75.5	0.87	6656	1
Cirrus®	93.1a	110.1	0.9	3.0	16.5	43.6	13.9	31.1	74.2	0.87	7483	1
DMS	5.7	30.9	1.6	1.4	1.6	2.9	1.2	3.8	2.6	0.03	2013	
Maíces de grano azul												
CP89	99.1	165.5	3.2	3.6a	14.2a	49.6a	15.1a	27.9	67.6	0.91a	8792a	6
CP147	89.7a	149.9a	1.9a	3.8a	14.9a	48.5a	14.8a	28.5a	67.1	0.90a	7869	9
CP166	94.8	166.4	2.3	3.4a	14.0	50.0a	13.9a	26.4	67.0	0.91a	8995a	5

Cuadro 3. Continuación.

	DFF (días)	ALM (cm)	PACR (√%)	PACT (√%)	LGM (cm)	DMZ (mm)	NHIL (Núm)	NGH (Núm)	PHE (kg hL ⁻¹)	FACT	REND (kg ha ⁻¹)	NCF
CP184	92.0a	156.0	1.6a	3.0a	14.1	49.6a	15.5a	27.4	66.1	0.90a	7863	6
CP197	95.3	149.4a	2.3	4.9	14.3a	48.1a	15.4a	27.6	66.7	0.91a	8361a	6
VC3Z	93.2	155.1	2.0a	4.2a	14.3a	48.8a	15.3a	26.9	68.2	0.91a	9147a	7
VC4Z	92.7a	160.8	2.1a	4.0a	14.9a	49.7a	15.6a	28.6a	68.0	0.91a	9384a	9
VS09	99.4	133.6a	1.3a	3.5a	15.1a	47.1a	14.7a	29.0a	74.8a	0.87	7722	8
H12	99.4	138.1a	1.0a	4.1a	15.5a	46.4	14.8a	30.4a	72.6a	0.88	9363a	8
H14T	101.1	140.6a	1.9a	5.6	15.6a	45.2	13.0	30.9a	75.1a	0.88	9111a	6
DMS	3.1	17.6	1.2	1.3	1.3	3.0	1.8	2.8	2.7	0.01	1212	

DFF: días a 50 % de floración femenina, ALM: altura de mazorca, PACR: porcentaje de plantas con acame de raíz, PACT: porcentaje de plantas con acame de tallo, LGM: longitud de mazorca, DMZ: diámetro de mazorca, NHIL: número de hileras de la mazorca, NGH: número de granos por hilera, PHE: peso hectolítrico, FACT: factor de desgrane, REND: rendimiento de grano, NCF: Número de características favorables, DMS: diferencia mínima significativa. Medias con letras iguales en el sentido de las columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

y 33 %, para VC1B, VC2B y VC3B, respectivamente) en comparación con las PP, donde los porcentajes oscilaron de 25 a 51 %. Las variedades compuestas de grano blanco tuvieron rendimientos comparables al del híbrido y la variedad de polinización libre Sintético Serdán.

En los maíces de grano amarillo (Figura 1B), las variedades compuestas, en especial VC1A y VC3A, tuvieron rendimientos comparables a los de las tres mejores poblaciones progenitoras (CP118, CP316 y CP356) y como ellas, los afectaron en menor medida al variar los ambientes de producción. Las otras dos poblaciones progenitoras, al igual que VC2A, mostraron una tendencia a disminuir su rendimiento conforme disminuyó el potencial ambiental. Tanto las VC como las PP mostraron menor interacción con ambientes que la variedad de polinización libre V-55A y tuvieron rendimientos comparables a los mostrados por el híbrido comercial. Lo anterior muestra que en las variedades compuestas se conjuntaron atributos y comportamientos favorables presentes en varias de sus poblaciones progenitoras, y que son competitivas con algunas variedades mejoradas comerciales.

En la Figura 1C se observa el comportamiento del rendimiento de los maíces de grano azul. Las VC en las tres localidades mantuvieron altos rendimientos, superando a varias de sus PP. La producción de grano de las variedades compuestas se mantuvo relativamente constante en los ambientes favorables, y aun cuando disminuyó en el desfavorable, no se afectó tanto como el de sus poblaciones progenitoras. En rendimiento promedio, las

VC superaron en 733 kg ha⁻¹ a las PP y en 1543 kg ha⁻¹ a la variedad sintética VS-09; asimismo, lograron igualar los niveles de producción de los híbridos.

Al comparar el rendimiento de las VC contra el de las PP en los tres grupos de coloración, se observó que las VC mantuvieron el potencial productivo de sus progenitores. El rendimiento promedio de las PP en maíces de grano blanco, amarillo y azul fue de 9407, 7702 y 8376 kg ha⁻¹, respectivamente, mientras que en las VC fue de 9584, 7950 y 9265 kg ha⁻¹, respectivamente. Por otra parte, en las VC se observó que a partir del segundo ciclo de recombinación los rendimientos tuvieron menor variación.

DISCUSIÓN

Ocotepc y Máximo Serdán fueron los mejores ambientes de producción, debido a que 2019 fue un año más lluvioso en ambas localidades, por lo que los efectos de la canícula no fueron tan acentuados como en Soltepec, localidad esta última donde la presencia de vientos fuertes también ocasionó problemas de acame. La no significancia de la interacción localidades × materiales para el 82 % de las variables en maíces de granos blancos y azules, y el 45.5 % en granos amarillos implica que el nivel de expresión de la mayoría de las características medidas en los materiales se mantuvo constante a través de localidades, lo cual es un aspecto deseable; cuando ello no ocurre, se sugiere valorarla para evitar descartar variedades con un comportamiento promedio no tan bueno, pero que se desempeñan bien en determinados ambientes, o

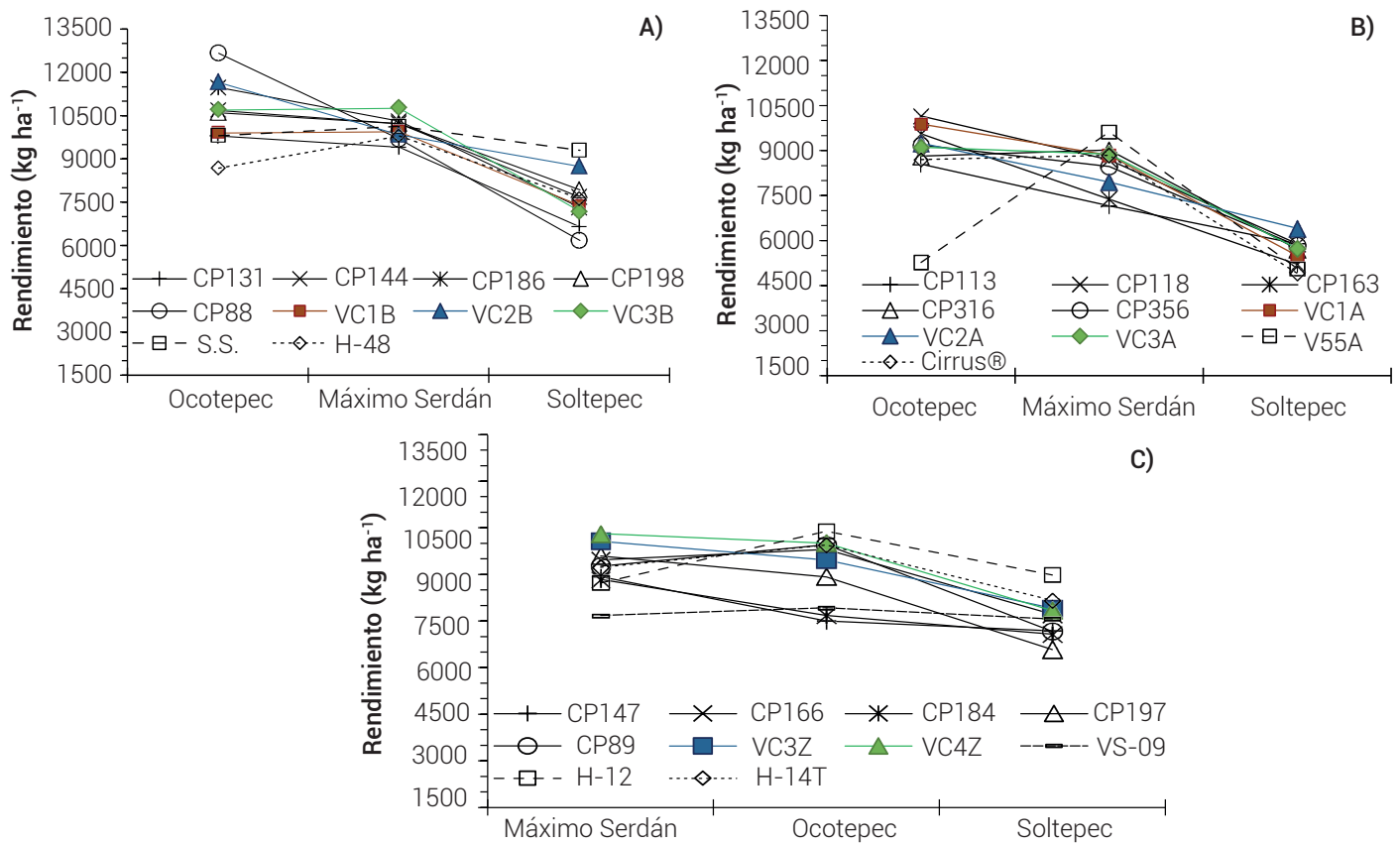


Figura 1. Rendimiento promedio de grano a través de localidades para las diferentes variedades evaluadas en el estudio. A) Maíces blancos, B) Maíces amarillos, C) Maíces azules. Microrregión Libres-Huamantla-Mazapiltepec, Puebla y Tlaxcala, 2019.

seleccionar una variedad con comportamiento promedio aceptable pero con desempeño pobre en un ambiente particular (Denis y Gower, 1996).

Los resultados directamente relacionados con los objetivos de la investigación conllevan a los siguientes hallazgos: a) las variedades compuestas mantuvieron atributos favorables presentes en las poblaciones progenitoras, y b) las variedades compuestas igualaron o superaron el rendimiento de los testigos.

Las variedades compuestas mantuvieron atributos favorables presentes en las poblaciones progenitoras

Un supuesto implícito de la formación de variedades compuestas es que en ellas se conjuntarán los atributos favorables presentes en las poblaciones que las integran. Los resultados de esta investigación validaron tal supuesto, pues las VC no sólo mantuvieron el nivel de expresión de caracteres sobresalientes presentes en las PP, tales como factor de desgrane y diversos componentes del rendimiento, sino que en algunos casos conjuntaron los

presentes en distintas PP; ello concuerda con lo planteado por Márquez (1991) en cuanto a que si bien las variedades compuestas tienen por objeto agrupar poblaciones de origen diverso, con alguna característica en común, se espera que también combinen características deseables dispersas en diferentes materiales, lo cual se cumplió en este caso, aun cuando las poblaciones progenitoras no tuvieron un origen tan diverso, pues provienen de una misma microrregión.

Con respecto al rendimiento, el de las VC de maíces blancos y amarillos fue estadísticamente igual al de las PP, y el de las VC azules fue mayor que el de varias PP. En promedio, el rendimiento de las VC sobrepasó el de las PP en 10.6, 3.2 y 1.8 % en los grupos azul, amarillo y blanco, respectivamente. Esto confirma lo señalado por Camarena *et al.* (2014) en cuanto a que se espera que las variedades compuestas sean capaces de superar el promedio de rendimiento de las variedades parentales. Si bien el aumento en rendimiento en las variedades compuestas no fue muy alto, éste igualó o excedió la heterosis promedio obtenida en cruces intervarietales

con poblaciones de origen diverso en Morelos (Cervantes-Adame *et al.*, 2020) y se ubicó en el intervalo establecido por Palemón *et al.* (2012) para cruza intervarietales en Guerrero. Las ganancias moderadas obtenidas con la formación de variedades compuestas pueden atribuirse al hecho de que las poblaciones apareadas provienen de un espacio geográfico relativamente pequeño (2374 km²). De acuerdo con Romero *et al.* (2002), la heterosis intervarietal está positivamente correlacionada con la divergencia geográfica, por lo que se espera que sea menor cuando se aparean progenitores de una misma región.

Una ventaja adicional en las variedades compuestas fue que, en general, su rendimiento tuvo menor afectación a través de ambientes que el de varias poblaciones progenitoras. Las poblaciones nativas presentan altos niveles de diversidad (Ortega, 2003), por lo que se espera que la variedad compuesta, al ser resultado del apareamiento aleatorio de tales materiales, tenga un nivel de variación genética aún mayor (Hallauer y Miranda, 1988); ello puede conferirles una mayor capacidad de amortiguamiento ante cambios ambientales. Al respecto, Carena (2005) mencionó que la heterogeneidad genética en híbridos poblacionales puede conferir una mayor plasticidad.

Se observó que el rendimiento de las variedades compuestas presentó menor fluctuación a partir del segundo ciclo de recombinación, comportamiento explicable porque de manera análoga a las variedades sintéticas, después de la primera generación de entrecruzamiento, se requieren una o dos generaciones más de apareamiento aleatorio para disipar gran parte del desequilibrio de ligamiento (Márquez-Sánchez, 1992a) que se origina cuando recién se forman los compuestos varietales.

Las variedades compuestas igualaron o superaron el rendimiento de los testigos

Los resultados mostraron que los híbridos presentaron iguales (maíces azules y amarillos) o mejores (maíces blancos) atributos de planta, tales como menor altura de mazorca, acame de raíz y de tallo que las variedades compuestas, debido a que son características en las que se pone énfasis durante la formación de híbridos (Duvick, 2005). Las variedades compuestas tuvieron niveles de expresión muy similares a los de las variedades de polinización libre, comportamiento atribuible a que estas últimas, por su forma de obtención (Arellano *et al.*, 2013), son más parecidas a las variedades compuestas. Con relación al rendimiento, las variedades compuestas tuvieron valores comparables al de las variedades mejoradas. Las diferencias numéricas fueron más

notorias con respecto a las variedades de polinización libre (similares en constitución genética), particularmente en maíces amarillos y azules, no así en blancos, ya que el testigo empleado (Sintético Serdán) fue generado de manera análoga a las variedades compuestas estudiadas. La capacidad de las poblaciones nativas de igualar o superar el rendimiento de las mejoradas ha sido documentada en múltiples microrregiones (López *et al.*, 2020; Muñoz, 2005; Ortiz-Torres *et al.*, 2013). Los datos encontrados en este trabajo apuntan a que dicho comportamiento se mantiene en las variedades compuestas derivadas de tales poblaciones; a pesar de ello, se evidencia la conveniencia de hacer selección en las variedades compuestas para características de planta como las ya mencionadas.

Los elementos previamente expuestos apuntan a que la formación de variedades compuestas representa una opción adecuada para aprovechar, en una primera etapa, las poblaciones nativas sobresalientes detectadas en programas de fitomejoramiento a escala microrregional. Algunas ventajas asociadas con este tipo de materiales son que, al estar integradas por poblaciones nativas, y mantener las características de éstas, resultarán análogas a los maíces nativos que emplea el agricultor, por lo que podrá utilizarlas para los usos tradicionales que acostumbra, practicar selección en ellas para adecuarlas a sus necesidades y recuperar semilla a la cosecha. Los resultados de esta investigación proveen evidencias que sustentan lo planteado por Márquez (1991), Márquez-Sánchez (1992b) y Kutka (2011) en cuanto a que las variedades compuestas pueden ser empleadas como variedades mejoradas de polinización libre.

CONCLUSIONES

Las variedades compuestas de maíz evaluadas compararon favorablemente tanto en atributos agronómicos como en rendimiento de grano con las poblaciones progenitoras de las cuales se derivaron, ya que mantuvieron o mejoraron en diferente medida el nivel de expresión de diversas características, y conjuntaron las favorables en algunos casos. Adicionalmente, compitieron con los testigos en rendimiento de grano. Por lo anterior, se considera que las variedades compuestas constituyen una vía adecuada para aprovechar el potencial genético contenido en los maíces nativos sobresalientes identificados en programas de fitomejoramiento microrregional.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarado-Beltrán G., H. López-Sánchez, A. Santacruz-Varela, A. Muñoz-Orozco, E. Valadez-Moctezuma, M. A. Gutiérrez-Espinosa, ... and O. R. Taboada-Gaytán (2019) Morphological variability of native maize (*Zea mays* L.) of the West highland of Puebla and East highland

- of Tlaxcala, Mexico. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Cuyo* 51:217-234.
- Arellano V. J. L., I. Rojas M. y G. F. Gutiérrez H. (2013)** Híbridos y variedades sintéticas de maíz azul para el Altiplano Central de México: potencial agronómico y estabilidad del rendimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4:999-1011, <https://doi.org/10.29312/remexca.v4i7.1141>
- Camarena M. F., J. Chura C. y R. H. Blas S. (2014)** Mejoramiento Genético y Biotecnológico de Plantas. Universidad Nacional Agraria La Molina-AGROBANCO. La Molina, Perú. 277 p.
- Carena M. J. (2005)** Maize commercial hybrids compared to improved population hybrids for grain yield and agronomic performance. *Euphytica* 141:201-208, <https://doi.org/10.1007/s10681-005-7072-0>
- Carvalho V. P., C. F. Ruas, J. M. Ferreira, R. M. P. Moreira and P. M. Ruas (2004)** Genetic diversity among maize (*Zea mays* L.) landraces assessed by RAPD markers. *Genetics and Molecular Biology* 27:228-236, <https://doi.org/10.1590/s1415-47572004000200017>
- Cervantes-Adame Y. F., H. Rebolloza-Hernández, E. Broa-Rojas, A. Olvera-Velona y G. Bahena-Delgado (2020)** Efectos de heterosis en poblaciones nativas de maíz y sus cruces F₁. *Biotecnica* 22:11-19, <https://doi.org/10.18633/biotecnica.v22i3.992>
- CIMMYT, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (1985)** Manejo de los Ensayos e Informes de los Datos para el Programa de Ensayos Internacionales de Maíz del CIMMYT. CIMMYT. México, D. F. 20 p.
- Denis J. B. and J. C. Gower (1996)** Asymptotic confidence regions for biadditive models: interpreting genotype-environment interactions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 45:479-493, <https://doi.org/10.2307/2986069>
- Duvick D. N. (2005)** The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). *Advances in Agronomy* 86:83-145, [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(05\)86002-x](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(05)86002-x)
- Gil M. A. (2011)** Estudio de caso 5.1: Los patrones varietales en maíz. In: La Biodiversidad en Puebla: Estudio de Estado. A. Handal S., B. Cantú M., O. A. Villarreal E. B., P. A. López L., López R., A Cruz A. y F. Camacho R. (eds.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Puebla, México. pp:232-233.
- Gómez M. N. O., M. A. Cantú A., M. G. Vázquez C., C. del Á. Hernández G., F. Aragón C., A. Espinosa C. y M. Tadeo R. (2017)** Variedad mejorada de maíz azul 'V-239AZ' para las regiones semicálidas de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8:1905-1910, <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.714>
- González M. J., J. A. López S., F. Briones E., S. E. Varela F., C. A. Reyes M. y J. A. Pecina M. (2014)** Programa de manejo, conservación y mejoramiento de maíz nativo de la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. *Investigación y Ciencia* 22:76-83.
- Hallauer A. R. and J. B. Miranda F. (1988)** Quantitative Genetics in Maize Breeding. Iowa State University Press. Ames, Iowa, USA. 468 p.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020)** Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos 2010. Puebla. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825293109> (Enero 2021).
- Kutka F. (2011)** Open-pollinated vs. hybrid maize cultivars. *Sustainability* 3:1531-1554, <https://doi.org/10.3390/su3091531>
- López P. A., E. Ortiz-Torres, A. Gil-Muñoz, J. D. Guerrero-Rodríguez, O. R. Taboada-Gaytán, H. López-Sánchez y J. A. Hernández-Guzmán (2020)** Patrón varietal y rendimiento de grano de maíces locales del Valle de Tehuacán, Puebla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43:525-532, <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.4-A.525>
- Márquez S. F. (1991)** Genotecnia Vegetal. Métodos, Teoría, Resultados. Tomo III. AGT Editor, S. A. México, D. F. 500 p.
- Márquez S. F., L. Sahagún C., V. J. Carrera A. y E. Barrera G. (2000)** Retrocruza Limitada para el Mejoramiento Genético de Maíces Criollos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 52 p.
- Márquez-Sánchez F. (1992a)** Inbreeding and yield prediction in synthetic maize cultivars made with parental lines: I. Basic methods. *Crop Science* 32:345-349, <https://doi.org/10.2135/cropsci1992.0011183x003200020013x>
- Márquez-Sánchez F. (1992b)** On the yield prediction of composite varieties of maize. *Maydica* 37:271-274.
- Márquez-Sánchez 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* 5:151-166.
- Márquez-Sánchez F. (2014)** Epistasia en la variedad, la cruza varietal, el compuesto varietal y el sintético del maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37:319-324, <https://doi.org/10.35196/rfm.2014.4.319>
- Márquez-Sánchez F. and J. Sahagún-Castellanos (2002)** Synthetic varieties or composite varieties? *Maydica* 47:103-105.
- Molina G. J. D. (1983)** Selección Masal Visual Estratificada en Maíz. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México, México. 35 p.
- Muñoz O. A. (2005)** Centli-Maíz. Prehistoria e Historia, Diversidad, Potencial, Origen Genético y Geográfico. Glosario Centli-Maíz. Segunda edición. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 211 p.
- Muñoz-Tlahuiz F., J. D. Guerrero-Rodríguez, P. A. López, A. Gil-Muñoz, H. López-Sánchez, E. Ortiz-Torres, ... y M. Valadez-Ramírez (2013)** Producción de rastrojo y grano de variedades locales de maíz en condiciones de temporal en los Valles Altos de Libres-Serdán, Puebla, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 4:515-530.
- Ortega P. R. (2003)** La diversidad del maíz en México. In: Sin Maíz No Hay País. G. Esteva y C. Marielle (coords.). Museo Nacional de Culturas Populares. México, D. F. pp:123-154.
- Ortiz-Torres E., P. A. López, A. Gil-Muñoz, J. D. Guerrero-Rodríguez, H. López-Sánchez, O. R. Taboada-Gaytán, ... y M. Valadez-Ramírez (2013)** Rendimiento y calidad de elote en poblaciones nativas de maíz de Tehuacán, Puebla. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 19:225-238, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2012.02.006>
- Palemón A. F., N. O. Gómez M., F. Castillo G., P. Ramírez V., J. D. Molina G. y S. Miranda C. (2012)** Potencial productivo de cruces intervarietales de maíz en la región semicálida de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3:157-171, <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i1.1490>
- Ramírez-Díaz J. L., A. Ledesma-Miramontes, V. A. Vidal-Martínez, N. O. Gómez-Montiel, J. A. Ruiz-Coral, G. A. Velázquez-Cardelas, ... y L. A. Nájera-Calvo (2015)** Selección de maíces nativos como donadores de características agronómicas útiles en híbridos comerciales. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38:119-131, <https://doi.org/10.35196/rfm.2015.2.119>
- Rocandío-Rodríguez M., A. Santacruz-Varela, L. Córdova-Téllez, H. López-Sánchez, F. Castillo-González, R. Lobato-Ortiz, ... y R. Ortega-Paczka (2014)** Caracterización morfológica y agronomía de siete razas de maíz de los Valles Altos de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37:351-361, <https://doi.org/10.35196/rfm.2014.4.351>
- Romero P. J., F. Castillo G. y R. Ortega P. (2002)** Cruzas de poblaciones nativas de maíz de la raza Chalqueño: II. Grupos genéticos, divergencia genética y heterosis. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:107-115
- Sánchez G. J. J., M. M. Goodman and C. W. Stuber (2000)** Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany* 54:43-59, <https://doi.org/10.1007/BF02866599>
- Sánchez-Domínguez S., A. Muñoz-Orozco y V. A. González-Hernández (2006)** Evaluación de la resistencia a sequía de variedades de cacahuate (*Arachis hypogaea* L.) de hábito de crecimiento rastrojo y erecto. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 12:77-84, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2004.09.047>
- SAS Institute (2020)** SAS University Edition. SAS Institute. Cary, North Carolina, USA. https://www.sas.com/es_mx/software/university-edition.html (Enero 2020).
- Steel R. G. D. and J. H. Torrie (1985)** Bioestadística: Principios y Procedimientos. R. Martínez B. (trad.). Segunda edición. McGraw-Hill de México, S. A. de C. V. México, D. F. 622 p.