

ADAPTACIÓN Y SELECCIÓN DE MAÍCES NATIVOS EN LA REGIÓN DEL BAJÍO DE MÉXICO POR SU CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA

ADAPTATION AND SELECTION OF NATIVE MAIZE IN THE MEXICAN BAJIO REGION BASED ON MORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION

J. Antonio Rangel-Lucio¹, Amalio Santacruz-Varela², Leobigildo Córdova-Téllez²,
J. Guadalupe García-Rodríguez^{3*}, Francisco Cervantes-Ortíz³, Humberto
Vaquera-Huerta² y Jesús Alberto Cuenca-Salgado³

¹Tecnológico Nacional de México (TecNM), Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. ²Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Programa de Recursos Genéticos y Productividad, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. ³TecNM, Instituto Tecnológico de Roque, Celaya, Guanajuato, México.

*Autor de correspondencia (garcia_2956@hotmail.com)

RESUMEN

La caracterización morfológica es un proceso de gran importancia para incorporar germoplasma de valor en los programas de introducción de maíz (*Zea mays* L.) con fines de mejoramiento genético. El objetivo del presente estudio fue caracterizar un grupo de 90 accesiones de 12 razas de maíz nativo de México: Bofo, Celaya, Coscomatepec, Elotes Occidentales, Harinoso de Ocho, Dulce de Jalisco, Mushito, Pepitilla, Serrano de Jalisco, Tablilla de Ocho, Tabloncillo y Zamorano Amarillo para identificar aquellas con mejores características productivas y de adaptación en el Bajío de México. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar y se evaluaron caracteres agronómicos de la planta, espiga, mazorca y grano. Hubo diferencias significativas entre las accesiones de maíz nativo. El rendimiento de grano más alto se registró en las accesiones Gto-101 (8.3 t ha⁻¹), Dgo-18 y Jal-554 de la raza Celaya y Jal-633 (6.0 t ha⁻¹) de Elotes Occidentales. La mayor altura de planta y de mazorca y dimensiones de la espiga (longitud de pedúnculo, del tramo del eje con ramas y del eje principal) se presentaron en las accesiones Ver-406 (raza Coscomatepec), Nay-214 (Harinoso de Ocho), Dgo-218 (Celaya), y en Nay-191, Nay-196 y Nay-217 (Bofo). El análisis de conglomerados integró a las razas Bofo, Celaya y Elotes Occidentales en los Grupos I, II y III, mientras que el Grupo IV fue integrado por Mushito, Pepitilla, Bofo y Tabloncillo, y el Grupo V por mezclas de las razas evaluadas, excepto Celaya. Fue posible identificar accesiones de las razas de maíz Bofo, Celaya y Elotes Occidentales prometedoras para el Bajío de México.

Palabras clave: *Zea mays*, accesión, carácter agronómico, maíz nativo, producción de grano, razas de maíz mexicano.

SUMMARY

Morphological characterization is a process of great importance to incorporate valuable germplasm in the introduction programs of maize (*Zea mays* L.) for breeding purposes. The objective of this study was to characterize a group of 90 accessions of 12 maize races native to Mexico: Bofo, Celaya, Coscomatepec, Elotes Occidentales, Harinoso de Ocho, Dulce de Jalisco, Mushito, Pepitilla, Serrano de Jalisco, Tablilla de Ocho, Tabloncillo and Zamorano Amarillo to identify those with the best productive characteristics and adaptation to the Bajío region in Mexico. A randomized complete block design was used and agronomic traits of the plant, tassel, ear and grain were evaluated. There were significant differences between native maize accessions. The highest grain yield was registered in the accessions Gto-101 (8.3 t ha⁻¹), Dgo-18 and Jal-554 of the Celaya race and Jal-633 (6.0 t ha⁻¹) of Elotes Occidentales. The largest plant and ear height and tassel dimensions

(length of the peduncle, of the branched section and the main axis) occurred in accessions Ver-406 (Coscomatepec race), Nay-214 (Harinoso de Ocho), Dgo-218 (Celaya), Nay-191, Nay-196 and Nay-217 (Bofo). The cluster analysis incorporated the Bofo, Celaya and Elotes Occidentales races into Groups I, II and III, while Group IV was integrated by Mushito, Pepitilla, Bofo and Tabloncillo, and Group V by mixture of the races evaluated, except Celaya. It was possible to identify promising accessions of Bofo, Celaya and Elotes Occidentales maize races for the Mexican Bajío.

Index words: *Zea mays*, accession, agronomic character, grain production, Mexican maize races, native maize.

INTRODUCCIÓN

La distribución, el nivel de producción y consumo de grano y forraje y sus derivados, colocan al maíz (*Zea mays* L.) como cultivo de importancia mundial. La mayor diversidad genética de maíz se concentra en el sur de México y Guatemala (Coutiño-Estrada *et al.*, 2010). Existe un registro de 64 razas de maíz reportadas en México (CONABIO, 2020), pero el manejo, migración de polen, selección e intercambio de semilla entre productores producen cambios y con frecuencia reducen la diversidad (Guillén-de la Cruz *et al.*, 2014); es decir, la diversidad del maíz depende de factores biológicos, ambientales y antropocéntricos (Ortega-Villegas *et al.*, 2018) y se estudia con varios propósitos, como conocer la variabilidad y plantear la clasificación en razas, contar con germoplasma suficiente y ampliar la variabilidad genética para mejoramiento (CONABIO-TEEB, 2017), lo cual se apoya en la caracterización y evaluación de los maíces nativos.

En el centro del país, la diversidad de poblaciones de maíz es dinámica y compleja; por ejemplo, al oriente de la Ciudad de México, a pesar del predominio de la raza Chalqueño es posible localizar a Arrocillo Amarillo, Ancho y Cacahuacintle (Herrera-Cabrera *et al.*, 2004), y dicha complejidad se extiende hacia Puebla (Hortelano *et*

al., 2012), donde Chalqueño y su variante Chalqueño Crema resultan comunes. Hacia el sur, en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, predomina Zapalote Chico (Cabrera-Toledo *et al.*, 2019) con seis grupos, clasificados a su vez en tipos conocidos localmente como maíz chico y maíz grande (López *et al.*, 2005), en tanto que en el municipio de Tlaxiaco en la región Mixteca Alta ocurre una variación morfológica y rendimiento importantes y las mazorcas guardan parecido con las razas Bolita, Serrano Mixe y Ancho (Chávez-Servia *et al.*, 2011). Resultados de Diego-Flores *et al.* (2012) en la Mixteca Baja de Oaxaca indican que la espiga, mazorca y grano de 60 poblaciones fueron similares a los de las razas Celaya, Bolita, Pepitilla y Ancho; ciertos complejos raciales estuvieron asociados con la geografía y elevación. El análisis ecogeográfico determina el grado de adaptación climática de razas y accesiones para comprender la diversidad genética, planeación de colectas futuras y fundamentar programas de conservación *in situ* de maíz (Ruiz *et al.*, 2008).

El concepto de raza de maíz ha evolucionado; Ron *et al.* (2006) describen a la raza como grupos de poblaciones con características numerosas y genes comunes, que las agrupa y diferencia de otras, hereda sus características a generaciones futuras y ocupa un área ecológica particular. Muñoz (2005) agrega el individuo como componente básico del concepto de raza, el cual emparenta con genotipos similares. Esa evolución ha permitido la continuidad y ejecución de ensayos de caracterización de maíz, no sólo como parte de programas de mejoramiento sino también como fuente de materiales sobresalientes, factibles de producir en situaciones climáticas y edáficas desfavorables. La precipitación pluvial es escasa y errática en casi todo México, lo que también provoca producción baja de grano de maíz, la cual es estimada en 2.4 t ha⁻¹ en temporal (SIAP, 2020). También se suman aspectos socioeconómicos contrastantes, como la tecnología agrícola destacada en la región Bajío de México, que emplea maíces mejorados y la escasa atención hacia maíces nativos. En este contexto, este estudio tuvo por objetivo caracterizar morfológicamente 90 accesiones de maíz nativo como prueba de su respuesta adaptativa, a fin de identificar y proponer materiales genéticos promisorios para reforzar la base genética en la región Bajío de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

La evaluación de los materiales se realizó en Celaya, Guanajuato, México en un sitio con coordenadas 20° 30' 28" LN y 100° 50' 00" LO y 1745 msnm. El clima de la región es BS₁ hw(w)(e), con precipitación pluvial media anual de 599.2 mm principalmente en verano y temperatura media

anual de 19.6 °C (García, 1988). El suelo es Vertisol Pélico.

Material genético

El material genético evaluado consistió en 90 accesiones correspondientes a 12 razas de maíz y fue proporcionado por el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México, a través del proyecto "El Maíz Mexicano y su Diversidad Molecular". Las razas (y número de accesiones) fueron: Bofo (11), Celaya (17), Coscomatepec (1), Elotes Occidentales (16), Harinoso de Ocho (1), Dulce de Jalisco (6), Mushito (10), Pepitilla (10), Serrano de Jalisco (2), Tablilla de Ocho (7), Tabloncillo (8) y Zamorano Amarillo (1), con adaptación a altitudes intermedias.

Siembra y manejo

La siembra fue efectuada el 11 de mayo de 2009 bajo "punta de riego" (con un riego inicial), precipitación pluvial de 461 mm y dos riegos de auxilio durante el ciclo. La siembra fue de dos semillas por mata en forma manual cada 50 cm, en surcos de 0.80 m de separación y 5.0 m de longitud, para una densidad de población de 48,000 plantas por hectárea. El manejo técnico del cultivo se basó en la recomendación de SAGARPA-INIFAP-SENASICA (2015). En el suelo se aplicó la dosis de fertilización 240-40-00 con urea y super fosfato de calcio triple, complementada con 2 L ha⁻¹ de Plantafol® (20-20-20 y micronutrientes), cuando la planta alcanzó entre 0.40 y 0.60 m de altura. Las malezas se controlaron manual y mecánicamente (45 días después de la siembra), y con agroquímicos recomendados (1 L ha⁻¹ de 2,4-D amina en etapa vegetativa y 1 L ha⁻¹ de Nicosulfuron en la fase reproductiva y maduración de grano).

Diseño y unidad experimental

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental fue de dos surcos de 5.0 m de longitud y 0.8 m de separación con dos plantas cada 0.50 m.

Variables medidas

Las variables se y registraron conforme a la guía técnica para maíz (SAGARPA-SNICS, 2014). Los caracteres considerados fueron: a) agronómicos [producción de mazorca (Rm) en t ha⁻¹, producción de grano (Rg) en t ha⁻¹, producción de olote (Ro) en t ha⁻¹, días a floración masculina (Fm), altura de planta (Ap) en cm, altura de mazorca (Am) en cm y número de hojas arriba de la mazorca (Hm)]; b) de la espiga [longitud del pedúnculo (Lp) en cm, longitud del tramo del eje con ramas (Le) en cm, longitud del eje principal (Lr) en cm y número de ramas laterales primarias

(Re); c) de la mazorca [longitud y diámetro de mazorca (Lm, Dm) en cm, diámetro de olote (Do) en cm, número de hileras (Nh) y número de granos por hilera (Gh)] y d) del grano [peso de 1000 granos (Pm) en g].

Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos a análisis de varianza y, en los casos donde se presentaron resultaron diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$); así mismo, se obtuvo la matriz de correlaciones de Pearson, utilizada para realizar un análisis de componentes principales (CP), cuyos valores se utilizaron para representar la dispersión de accesiones y razas de maíz en el plano bidimensional formado por dichos componentes. El resultado permitió identificar las accesiones y razas con mayor diversidad morfológica. Enseguida, se hizo una agrupación de accesiones por el método aglomerativo de Ward (Murtagh y Legendre, 2014). Los datos fueron procesados en los programas SAS® Ver. 9.1.3 (SAS Institute, 2002), Statistica Ver. 7 y Minitab Ver. 19.2.0.

RESULTADOS

Análisis de varianza

El análisis de varianza detectó variación significativa ($P \leq 0.01$) entre las accesiones de maíz nativo para los caracteres agronómicos de planta, espiga, mazorca y grano, lo que prueba la existencia de una diversidad fenotípica importante entre las accesiones y las razas (Cuadro 1). En este mismo cuadro se observan variables con CV menores de 20 % para Fm, Lp, Lm, Dm, Do, Gh y Pm, así como grados de libertad distintos, lo cual obedece a la variación en el número de accesiones utilizados para cada raza de maíz nativo.

Análisis de correlación

Los caracteres de planta, espiga y mazorca mostraron un coeficiente $r \geq 0.75$ ($P \leq 0.05$) con ciertas variables. Valores de correlación positiva fuerte a correlación positiva perfecta ($r > 0.84^{**}$) ocurrieron en el crecimiento en longitud de Ap con Am, Lr, Le y Lp; Am con Lr, Le y Lp; Lr con Le y Lp; Le con Lp; así como en Rm con Rg. En cambio, Dm tuvo correlación moderada con Rm y Rg ($r = 0.69^{**}$ y $r = 0.68^{**}$).

Análisis de componentes principales

La proporción de la variación total explicada por cada componente principal (CP) se presenta en el Cuadro 2. El CP1 explicó 28.2 % de la variabilidad de los caracteres morfológicos de las poblaciones de maíz nativo, mientras

que los CP2, CP3 y CP4 explicaron el 23.4, 10.5 y 6.8 % de la variabilidad, respectivamente. Los cuatro componentes presentan una varianza acumulada de 70 %; sin embargo, los dos primeros fueron suficientes para explicar de manera aceptable la diversidad de caracteres morfológicos entre accesiones.

La dispersión de accesiones en reveló la integración de éstas en grupos de razas de maíz (Figura 1). En el CP1 destacaron Ver-406 (identificado con la literal V en la Figura 1), Gro-214 (E), Dgo-218 (C) y Nay-191(B) con valores negativos, y Zac-183 (T), Zac-172 (E), SLP-50 y Zac-79 (D) hacia el conjunto de valores positivos, en tanto que en CP2 sobresalieron Ver-406 (V), Mor-99 (P) y Nay-201 (B) en el lado negativo y Jal-633 (E), Gto-101 (C) y Dgo-18 (C) con valores positivos. Por otra parte, en CP3 fueron importantes Jal-333 (C), Jal-19 (C) y Ver-406 (V) y en el CP4 aparecieron SLP-44 (T), Nay-221 (B), Dgo-122 (B) y Nay-38 (E). La dispersión de accesiones por cuadrantes formada por CP1 y CP2 (Figura 1) denota que en el Cuadrante II se ubicó el mayor número de accesiones de la misma raza, Celaya (C) con 76 % (13 accesiones). En el Cuadrante II también se observó 44 % (7) de Elotes Occidentales (E) y, en menor proporción, Harinoso de Ocho (H), Dulce de Jalisco (D), Mushito (M), Pepitilla (P) y Serrano de Jalisco (S, 1 de 2 accesiones). En el Cuadrante III se dispersó 64 % (7) de accesiones de Bofo, al igual que en los Cuadrantes I (9 %), II (18 %) y IV (9 %); aquí también se localizó 20 % (2) de accesiones de Pepitilla y las únicas accesiones de Harinoso de Ocho y Zamorano Amarillo.

Los caracteres morfológicos originales medidos en maíces nativos y su contribución a CPs aparecen en el círculo de correlaciones (Figura 2). Los caracteres que aportaron mayor variación al CP1 fueron Le ($r = -0.924$), Ap ($r = -0.918$), Lr ($r = -0.876$) y Lp ($r = -0.843$), localizados en el Cuadrante III; en cambio, Rm ($r = 0.781$) y Rg ($r = 0.765$) en la zona positiva del Cuadrante II aportaron la mayor variación al CP2. En los CP3 y CP4 lo fueron Hi ($r = 0.798$) y Am ($r = -0.728$). La sobreposición de imágenes de CP y círculo de correlaciones (Figuras 1 y 2) revela que Ver-406 (V) tuvo caracteres sobresalientes

en Le, Ap, Lr y Lp definidos en el CP1; en la misma situación se colocó a Nay-214 (H), Dgo-218 (C) y Nay-191, Nay-196 y Nay-217 (Bofo) en el Cuadrante III. Por otro lado, en CP2 la mayor variación de Rm y Rg ocurrió en Jal-633 (E), Gto-101 (C) y Dgo-218 (C) en el Cuadrante II, seguidos por Do y Dm; Fm, Lp, Lr, Re y Hm en Ver-406 (V), Mor-99 (P) y Nay-201 (B) en el Cuadrante III.

Análisis de conglomerados

La continuidad de agrupamientos originó los

conglomerados que formaron el dendrograma (Figura 3). Los caracteres que aportaron mayor diversidad fueron Le, Ap, Lr, Lp, Rm y Rg, con $r > 0.75$. El dendrograma revela cinco grupos de accesiones de maíz por su similitud. El Grupo 1 presentó mayor Rg experimental, encabezado por la raza Celaya, que comparte el Subgrupo 1 de las razas Bofo y Elotes Occidentales, mientras que Tabloncillo tuvo menor respuesta productiva en el Subgrupo 2. El Grupo II estuvo integrado por Elotes Occidentales, Pepitilla y Celaya como predominantes. El dendrograma definió dos subgrupos; el Subgrupo 1 integrado por ciertas accesiones de la raza Celaya, en tanto que en el Subgrupo 2 predominó

Celaya junto con Elotes Occidentales y Pepitilla.

El Grupo II se caracterizó por incidir en ciertos caracteres de planta, mazorca y grano. Dos tercios de las accesiones de maíz del Grupo III correspondieron a Bofo, que formó el subgrupo I, y el tercio restante fueron Elotes Occidentales, Zamorano Amarillo y Coscomatepec (Figura 3).

Coscomatepec mostró valores excepcionales en caracteres de planta, mazorca y espiga; Zamorano Amarillo, en cambio, lo fue sólo en caracteres de la mazorca. Con predominio de la raza Mushito, las razas Pepitilla, Bofo

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza y otros parámetros para 12 razas de maíz nativo evaluadas en Celaya, Guanajuato, México.

Variable	Grados de libertad	Cuadrado medio	Error	Media	Coefficiente de variación (%)
Caracteres agronómicos					
Producción de mazorca (Rm)	11	18.7**	5.7	4.3 t ha ⁻¹	25.3
Producción de grano (Rg)	11	16.3**	4.8	3.5 t ha ⁻¹	30.9
Producción de olote (Ro)	11	16.3 ^{ns}	0.2	0.8 t ha ⁻¹	25.4
Días a floración masculina (Fm)	11	1345.2**	305.3	81.1 d	20.0
Altura de planta (Ap)	9	6704.4**	2387	170.6 cm	28.6
Altura de mazorca (Am)	9	8301.0**	2618.6	124.0 cm	41.2
No. Hojas sobre la mazorca (Hm)	9	2.0**	4.7	4.7	46.1
Caracteres de la espiga					
Longitud de pedúnculo (Lp)	9	7176.5**	2488.4	21.8 cm	20.0
Longitud del tramo del eje con ramas (Le)	9	8096.8**	2598.3	22.5 cm	22.6
Longitud del eje principal (Lr)	9	12746.9*	3876.4	24.0 cm	25.9
No. Ramas laterales primarias (Re)	9	32.6**	25.3	13.1	38.4
Caracteres de la mazorca					
Longitud de mazorca (Lm)	10	44.5 ^{ns}	6.3	15.7 cm	16
Diámetro de mazorca (Dm)	10	2.0**	0.1	4.0 cm	7.9
Diámetro de olote (Do)	10	0.8**	0.1	2.7 cm	11.7
No. Hileras por mazorca (Hi)	10	71.5**	14.2	11.5	32.8
No. Granos por hilera (Gh)	10	200.1**	18.8	25.8	16.8
Caracteres del grano					
Peso de mil semillas (Pm)	10	49082.5**	2665.1	352.9 g	14.6

* y **: significancia estadística con $P \leq 0.01$ y $P \leq 0.05$, respectivamente, ns: no significativo.

Cuadro 2. Proporción de la varianza explicada y acumulada del CP1 al CP4.

Caracter	CP1	CP2	CP3	CP4
Valor propio	4.79	3.97	1.78	1.13
Varianza explicada	28.2	23.4	10.5	6.68
Varianza acumulada	28.22	51.61	62.11	68.79

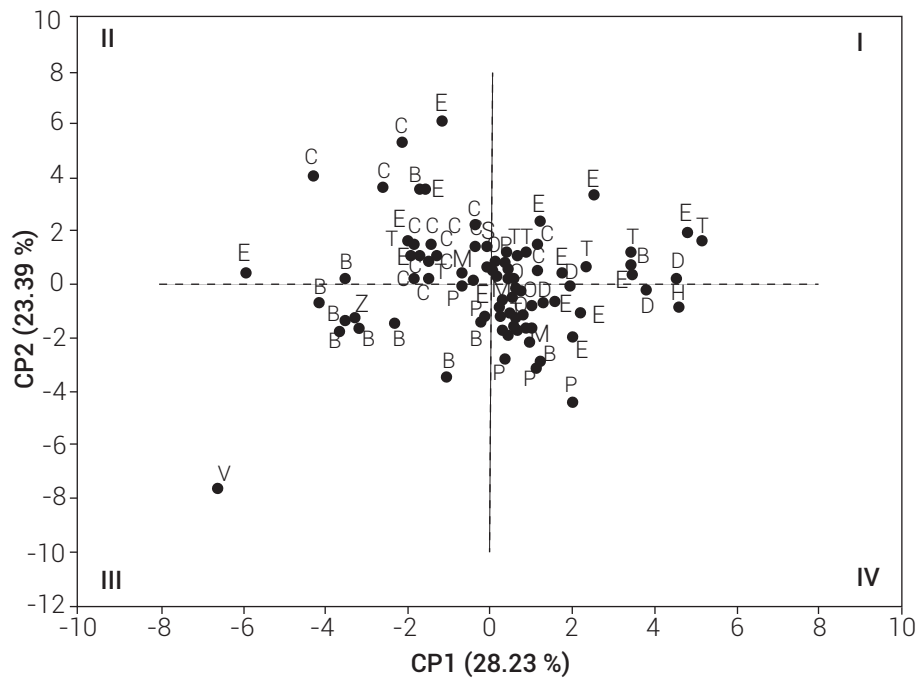


Figura 1. Proyección bidimensional de 90 accesiones de maíz nativo evaluadas en Celaya, Guanajuato, México. Razas Bofo (B), Celaya (C), Coscomatepec (V), Dulce de Jalisco (D), Elotes Occidentales (E), Mushito (M), Pepitilla (P), Serrano de Jalisco (S), Tablilla de Ocho (O), Taboncillo (T) y Zamorano Amarillo (Z). CP1: Componente principal 1, CP2: Componente principal 2.

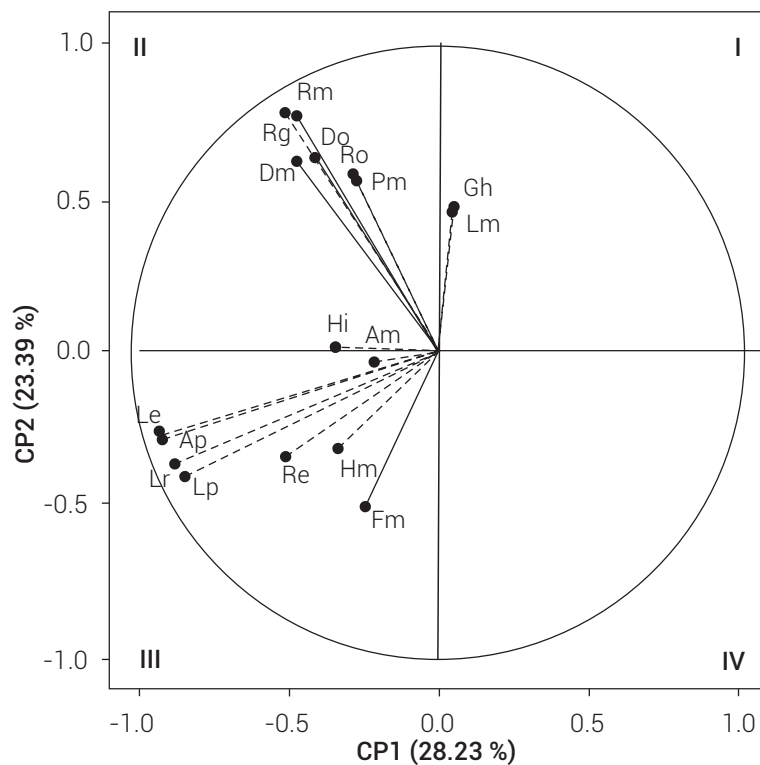


Figura 2. Círculo de correlaciones que muestra la dispersión de caracteres morfológicos de 90 accesiones de 12 razas de maíz nativo en los componentes principales.

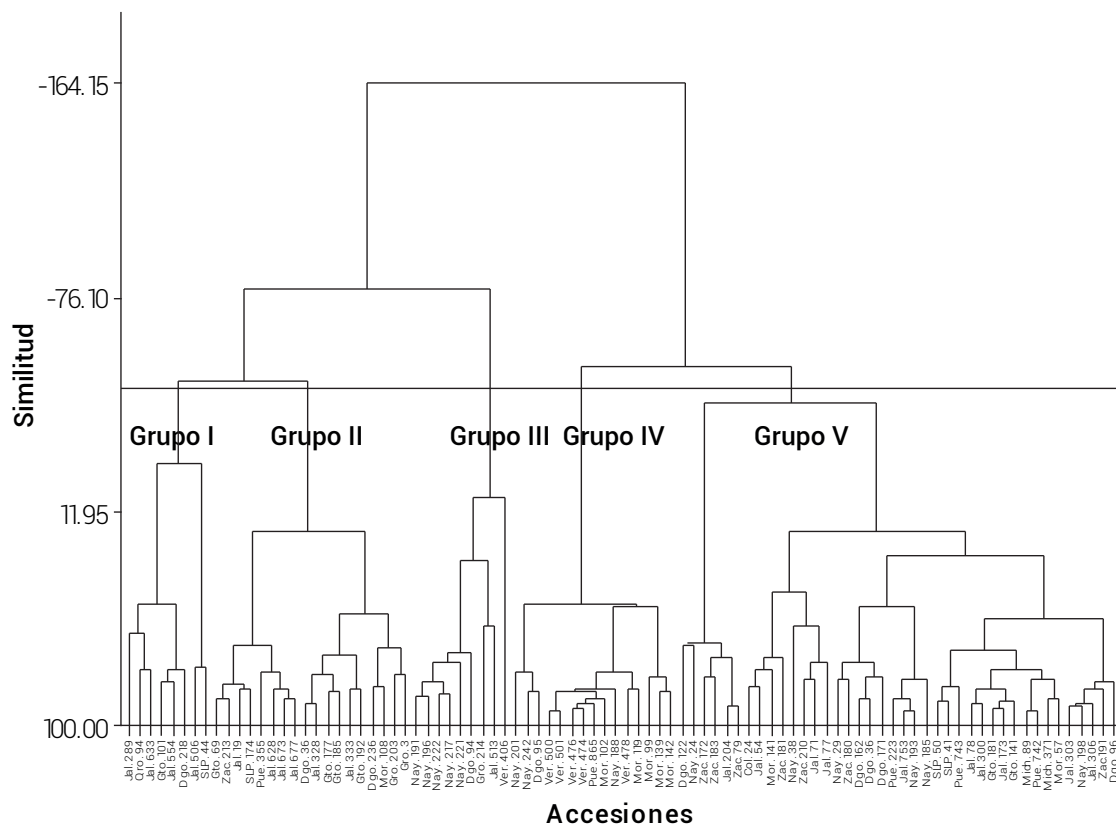


Figura 3. Dendrograma de 90 accesiones de 12 razas de maíz nativo de México, construido mediante el método Ward con distancias euclidianas provenientes de 17 variables morfológicas.

y una sola accesión de Tabloncillo sobresalieron en el Grupo IV del dendrograma (Figura 3), con mayor influencia de caracteres agronómicos de la planta y menor de la mazorca. Cinco subgrupos se formaron en el Grupo IV. El Grupo V fue abundante y diverso en razas; escapan Celaya, Coscomatepec y Zamorano Amarillo. En número de razas del Grupo V, las accesiones de Elotes Occidentales (11) fueron en mayor número que las de Tablilla de Ocho (7), Dulce de Jalisco (6), Tabloncillo (5), Mushito (4), Pepitilla (3), Serrano de Jalisco (2), Bofo (1) y Harinoso de Ocho (1). Así, el Subgrupo 1 fue más variado con cinco razas; la raza Elotes Occidentales dominó en el Subgrupo 2, junto con Dulce de Jalisco y Pepitilla; en el Subgrupo 3 aparecieron accesiones de Tabloncillo, Elotes Occidentales, Tablilla de Ocho, Pepitilla y Serrano de Jalisco. Dulce de Jalisco y Mushito encabezaron el Subgrupo 4, junto con algunas accesiones de Elotes Occidentales, Tabloncillo, Mushito y Serrano de Jalisco, mientras que Tablilla de Ocho fue única en el Subgrupo 5.

DISCUSIÓN

La variación de los caracteres de las 12 razas de maíz nativo (Cuadro 1) sería atribuida al origen, grado de domesticación o adaptación ambiental y a la amplia gama

de genotipos evaluados, por lo que eran de esperarse las diferencias estadísticas en el análisis de varianza. Los valores bajos del coeficiente de variación en Lp y Dm y Hi podrían indicar alta estabilidad ambiental de las razas de maíz implicadas. Al respecto, Muñoz (2005) señaló que la variación genética de maíz es producto del cultivo y selección practicada por agricultores, en respuesta al ambiente y uso antropocéntrico de la especie. El origen genético y geográfico de la raza Bofo (Ortega *et al.*, 2013a) pudo motivar que Harinoso de Ocho y Tabloncillo fueran estadísticamente iguales en Rm (4.8 y 5.5 t ha⁻¹) y Rg (3.9 y 3.6 t ha⁻¹); en situación estadística similar estuvo Rm de Pepitilla (3.3 t ha⁻¹). Salvo Ro en Dulce de Jalisco, Rm y Fm fueron similares en Bofo, Celaya, Elotes Occidentales, Dulce de Jalisco, Mushito, Pepitilla y Tablilla de Ocho; destaca la raza Celaya por menor tiempo de Fm (71 d) y su contraste, Coscomatepec (100 d), cultivada entre 1300 y 2000 msnm en la zona de barlovento y alta nubosidad de la Sierra Madre Oriental en Veracruz y Sierra Norte de Puebla (Ortega *et al.*, 2013a). También Ap, Am, Hm, Lp, Lr y Re fueron significativamente iguales en Bofo, Elotes Occidentales, Dulce de Jalisco, Tabloncillo y Celaya (excepto Lr en esta última). Las razas Celaya, Elotes Occidentales y Pepitilla mostraron significancia estadística en Lp, Re, Lm, Dm, Hi, Gh y Pm (Cuadro 1). Rm fue mayor

en Gto-101, Dgo-218 y Jal-554 con 9.0, 8.2 y 7.5 t ha⁻¹ de la raza Celaya y, como consecuencia, Rg fue de 8.3, 7.2 y 6.8 t ha⁻¹ en cada una, le siguieron Bofo y Elotes Occidentales. Este tipo de respuesta proviene de la evolución del maíz que ha permitido a Celaya, Bofo y Elotes Occidentales adaptarse a ambientes con precipitación pluvial anual menor de 580 mm o cultivarse bajo riego (Ruiz *et al.*, 2008). La raza Celaya se distinguió por el mayor peso de mazorca, y peso y volumen de grano por mazorca (CONABIO, 2020).

La longitud de pedúnculo (25.3 cm) como caracter de la espiga pudo contribuir al mayor Rg de Dgo-218 de la raza Celaya; sin embargo, no fue estadísticamente comparable con el máximo valor (40.6 cm) observado en Ver-406 de Coscomatepec, la que expresó mayor Ap (3.73 m) como respuesta probable a su condición genética, en primer lugar, y a la mayor calidad de iluminación recibida, como segunda explicación. El crecimiento óptimo de Coscomatepec ocurre en Chiapas, Oaxaca, Durango, Chihuahua, México, Guerrero, Hidalgo y Querétaro (Ruíz *et al.*, 2013b). En el mismo sentido, algunas accesiones de Bofo y Elotes Occidentales rebasaron los 3.0 m de altura. En un trabajo afín, 11 accesiones de las razas Clavito, Gallina, Tusilla y Yunga colectadas en la zona Andina de Ecuador mostraron mayor aptitud agronómica en altitudes bajas, lo que supone no sólo adaptación local, sino un proceso evolutivo forzado hacia un ambiente distinto (Tapia *et al.*, 2015).

Un número importante de accesiones alcanzó Fm antes de 70 d, aunque Dgo-36 de la raza Celaya fue más precoz (58 d). Junto a Celaya aparecieron Tablilla de Ocho y Elotes Occidentales, al invertir 63 d o menos en Fm; en cambio, la única accesión de Coscomatepec y Mor-142, Mor-119 y Mor-141 de Pepitilla fueron más tardías (> 100 d). El fotoperíodo en el Bajío de México se amplía desde mitad de año hasta agosto (González *et al.*, 2008), período que coincide con la floración de diversas especies agrícolas, incluyendo maíz. La totalidad de accesiones de Bofo tuvo número alto de Hm. El número de hojas fue de nueve a 11, según la colecta, pero la mayor proporción se tuvo en accesiones provenientes de Nayarit, seguido por Durango y Jalisco; en cambio, 37 % de las accesiones de Elotes Occidentales sumó cuatro hojas sobre la mazorca; la proporción restante de accesiones formó entre cinco y seis hojas. Los granos en Hi (18) fueron representados en Ver-406, mientras que la mayor proporción de Gh se tuvo en mazorcas de Tablilla de Ocho, Serrano de Jalisco, Tabloncillo, Pepitilla y Elotes Occidentales. En esta última raza sobresalió Dgo-236 con 35 granos por hilera. Por otro lado, Jal-506, Jal-633 y Jal-289 de Tabloncillo, Elotes Occidentales y Bofo tuvieron mayor Pm: 502, 547 y 567 g, respectivamente.

En el análisis de componentes principales la mayoría de los caracteres de planta y espiga fueron expresados en los Cuadrantes II y III (Figura 1), en correspondencia con los grupos raciales de maíz nativo de Bofo, Celaya y Elotes Occidentales, dispersos en el gráfico biplot de CP (Figura 2), una vez sobrepuestas las Figuras 1 y 2. En el Cuadrante II de éstas se identificó mayor Rm y Rg de Gto-101 (9 y 8.3 t ha⁻¹), Dgo-18 (8.2 y 7.2 t ha⁻¹) y Jal-554 (7.5 y 6.8 t ha⁻¹) de la raza Celaya, y Jal-633 (7.4 y 6.0 t ha⁻¹) de Elotes Occidentales. Por producción de grano, Celaya es una raza importante en altitudes intermedias, de 1000 a 1800 msnm (CONABIO, 2020). En general, las accesiones de Celaya produjeron de 4.0 a 9.0 t ha⁻¹ de mazorca y de 3.2 a 8.3 t ha⁻¹ de grano. Esta amplitud de diferencias de rendimientos explica en parte la diversidad de respuestas entre y dentro de las razas de maíz en la región Bajío, uno de los ambientes más propicios para la actividad agrícola en México y el mundo, en particular para hortalizas y cereales.

Lobo *et al.* (2003) afirmaron que la variación genética coincide con el ambiente de producción, por la respuesta del germoplasma a factores de crecimiento de la planta. En Celaya, Guanajuato el rendimiento de grano promedio obtenido en temporada de lluvias entre 2000 y 2005 fue de 2 t ha⁻¹ en 76 % de la superficie (correspondiente a temporal) y en riego fue 6.47 t ha⁻¹ (FIRA, 2007). En contraste, Ángeles-Gaspar *et al.* (2010) registraron de 4.5 a 5.6 t ha⁻¹ de grano en tres poblaciones locales de maíz de Molcaxac, Puebla. México, con lo que superaron a variedades comerciales y confirmaron la mejor adaptación del maíz nativo en la zona, misma situación que se observó en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca (López *et al.*, 2005).

La reducción de Ap y Lp con frecuencia es deseable en el cruzamiento genético (Oliboni *et al.*, 2012). Los caracteres Ap, Le, Lr y Re también contribuyeron a la variación explicada por CP2 para Bofo, predominante en el Grupo III, a través de Nay-196 (Le = 27.2 cm y Lr = 28.9 cm) y Nay-191 (Le = 27 cm y Lr = 28.3 cm) en el Cuadrante III, y Dgo-94 (Le = 26.9 cm y Lr = 28.3 cm) en el Cuadrante II, junto a ciertas accesiones de Pepitilla. El resto de las accesiones de Bofo estuvieron dispersas en los Cuadrantes I, II y IV con menor contribución a CP2. La raza Bofo ha sido clasificada como nueva (Ortega *et al.*, 2013a) y pertenece al Grupo de Ocho Carreras, con mejor adaptación a condiciones tropicales y subtropicales (Ruíz *et al.*, 2013a).

En el dendrograma fueron identificados cinco grupos de razas de maíz nativo con similitud. En el Grupo I el mayor Rg fue para Gto-101 y Dgo-218 de Celaya, con 8.3 y 7.2 t ha⁻¹. En cambio, Jal-506 y SLP-44 de Tabloncillo tuvieron menor respuesta productiva en el Subgrupo 2, con 3.7 y 4.3 t ha⁻¹ de grano. En general, el Grupo I destacó por mostrar

mazorcas largas (17.3 cm) y diámetro grande (4.7 cm), al igual que Do grueso (3.1 cm), mayor Hi (27.5) y Pm (470 g). Estos caracteres pudieron definir la mejor respuesta del Grupo I a Rg. La raza Celaya tiene preferencia para mejora genética en el mundo (Ruiz *et al.*, 2013a). Las accesiones Jal-289 (raza B) y Qro-94 y Jal-633 (E) complementaron el Grupo I; la accesión Jal-289 (B) alcanzó mayor Pm (567 g). El Grupo II se caracterizó en lo colectivo por mayor Hi (13) y precocidad de Fm (71.2 d); en lo individual, las accesiones Jal-19 y Jal-333 formaron 16 hileras en la mazorca y Dgo-36 tuvo Fm de 58 d, todas de Celaya. El Grupo II también formó granos con menor Pm (241 g) en Dgo-236 (E); el Grupo II también mostró en lo colectivo plantas con Hm bajo (5.0) y, en lo individual, Jal-333 presentó menor Re (9). En el Grupo II, 78 % de las accesiones perteneció a la raza Celaya; el 12 % restante estuvo dividido por igual entre Elotes Occidentales y Pepitilla. La raza Harinoso de Ocho dio origen a las razas Bofo y Elotes Occidentales (Ortega *et al.*, 2013a); esta última fue probada en una elevación similar a su origen, Nayarit y Altiplanicie de Jalisco, México, bajo ciertas características ecológicas que le hayan sido favorables (Ruíz *et al.*, 2013a). Harinoso de Ocho también dio origen, indirectamente, a la raza Celaya (Hernández y Alanís, 1970).

Dos tercios de las razas de maíz del Grupo III correspondieron a Bofo, que formó el Subgrupo I; el otro tercio fueron Elotes Occidentales, Zamorano Amarillo y Coscomatepec (Figura 3). Estas dos últimas razas fueron representadas por una accesión cada una. Coscomatepec mostró valores excepcionales en Fm (100 d), Ap (3.7 m), Am (2.41 m), Lp (40.1 cm), Le (30.5 cm) y Lr (34.4 cm), así como Hi (18); Zamorano Amarillo, en cambio, lo fue en Lm (17 cm) y Dm (4.9 cm). A la raza Bofo se le localiza desde condiciones subtropicales a tropicales, en elevaciones de 2000 msnm, con requerimiento térmico de 1133 grados día desarrollo (GDD) por ciclo (Ruiz *et al.*, 2013b); en cambio, Coscomatepec es sensible a fotoperíodo y temperatura (Stevenson y Goodman, 1972), que destacan en el Bajío de México. La Fm tardía de Coscomatepec respondería a la presión selectiva de la domesticación, migración y adaptación (Yan *et al.*, 2011). Con predominio de Mushito (40 %), Pepitilla, Bofo y una sola accesión de Tabloncillo, sobresalieron en el Grupo IV del dendrograma (Figura 3) con Fm amplio (84 a 100 d), mejor representado por Mor-142 y Mor-119 de Pepitilla. Cinco subgrupos formaron el Grupo IV. La raza Mushito proviene de zonas altas del centro de México, mientras que Celaya y Pepitilla pertenecen al grupo Dentados Tropicales de alturas medias (Ortega *et al.*, 2013b).

El Grupo V es abundante en número y diversidad de razas (9); escapan Celaya, Coscomatepec y Zamorano Amarillo; en este grupo, el número de accesiones de

Elotes Occidentales (27.5 %) fue alto. Precisamente, el Subgrupo 1 del Grupo V fue de cinco razas, mientras que Elotes Occidentales sobresalió en el Subgrupo 2, junto con Dulce de Jalisco y Pepitilla. En el Subgrupo 3 sobresalieron accesiones de Tabloncillo, además de Elotes Occidentales, Tablilla de Ocho, Pepitilla y Serrano de Jalisco. Dulce de Jalisco y Mushito encabezaron el Subgrupo 4, con presencia adicional de accesiones de Elotes Occidentales, Tabloncillo, Mushito y Serrano de Jalisco. Tablilla de Ocho fue única en el Subgrupo 5. Los caracteres Ap, Am, Lp, Le, Lr, Re y Hi fueron bajos entre los grupos de accesiones en el dendrograma.

Los resultados de caracteres de planta, espiga y mazorca difieren de trabajos previos con propósitos similares (Diego-Flores *et al.*, 2012; Guillén-de la Cruz *et al.*, 2014; Hortelano *et al.*, 2012; Rocandio-Rodríguez *et al.*, 2014). En este contexto, algunas de las razas de maíz nativo propuestas en el presente estudio son prometedoras en la región Bajío de México para programas de mejoramiento genético o en cultivos comerciales, de manera que las características fenológicas y morfológicas encontradas en este estudio confirman el patrón biodiverso y variable de las poblaciones de maíz nativo de México en la región Bajío, por lo que tienen potencial para emplearse como portadoras de características individuales en la mejora de líneas y poblaciones futuras.

CONCLUSIONES

El rendimiento de mazorca y de grano, altura de planta, longitud del tramo del eje con ramas, longitud del eje principal y longitud del pedúnculo, así como días a floración masculina, fueron los caracteres con mayor aportación a la variabilidad fenotípica de los maíces nativos evaluados. Las razas de maíz sobresalientes en producción de grano para el ambiente del Bajío de México fueron Celaya, Elotes Occidentales y Bofo, mientras que Pepitilla, Bofo y Coscomatepec lo fueron en caracteres relacionados con la espiga y fenología. Entre las razas con mayor consistencia aparecen Celaya, Bofo y Elotes Occidentales; en cambio, se restringe la selección de Coscomatepec, Harinoso de Ocho y Zamorano Amarillo probablemente por el bajo número de accesiones probadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Ángeles-Gaspar E., E. Ortiz-Torres, P. A. López y G. López-Romero (2010) Caracterización y rendimiento de poblaciones de maíz nativas de Molcaxac, Puebla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33:287-296, <https://doi.org/10.35196/rfm.2010.4.287>
- Cabrera-Toledo J. M., A. Carballo-Carballo, J. A. Mejía-Contreras, G. García-De los Santos y H. Vaquera-Huerta (2019) Caracterización de poblaciones sobresalientes de maíz de la raza Zapalote Chico. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42:269-279, <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.3.269-279>

- Chávez-Servia, J. L., P. Diego-Flores y J. C. Carrillo-Rodríguez (2011) Complejos raciales de poblaciones de maíz evaluadas en San Martín Huamelulpan, Oaxaca. *Ra Ximhai* 7:107-115, <https://doi.org/10.35197/rx.07.01.2011.10.jc>
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2020) Razas de maíz de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz> (Mayo 2021).
- CONABIO-TEEB, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-The Economics of Ecosystems & Biodiversity (2017) Ecosistemas y agrobiodiversidad en sistemas de producción de maíz de pequeña y gran escala. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. https://www.biodiversidad.gob.mx/media/1/genes/files/resumen_ejecutivo_TEEB.pdf (Enero 2021).
- Coutiño-Estrada B., V. A. Vidal-Martínez y Grisel Sánchez Grajales (2010) Selección de maíces criollos con calidad elotera bajo condiciones de riego y temporal en Chiapas. *In: Mejoramiento, Conservación y Uso de los Maíces Criollos*. M. B. Nájera R. y C. A. Ramírez M. (eds.). Publicación Especial. Sociedad Mexicana de Fitogenética. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del Estado de Michoacán. México. D. F. pp:182-194.
- Diego-Flores P., J. C. Carrillo-Rodríguez, J. L. Chávez-Servia y F. Castillo-González (2012) Variabilidad en poblaciones de maíz nativo de la Mixteca Baja Oaxaqueña, México. *Revista FCA UNCUYO* 44:157-171.
- FIRA, Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (2007) Cultivo de maíz blanco. Análisis de Rentabilidad P-V 2006 y Costos de Cultivo 2007. Residencia Estatal Guanajuato. León, Guanajuato. 44 p. https://www.fira.gob.mx/Nd/MAIZ_PV_Guanajuato_-_Rentabilidad_2006_Costos_2007.pdf (Mayo 2020).
- García E. (1988) Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México. D. F. 220 p.
- González T. G., F. M. Mendoza H., J. Covarrubias P., N. Morán V. y J. A. Acosta G. (2008) Rendimiento y calidad de semilla de frijol en dos épocas de siembra en la región del Bajío. *Agricultura Técnica en México* 34:421-430.
- Guillén-de la Cruz P., E. de la Cruz-Lázaro, S. A. Rodríguez-Herrera, G. Castañón-Nájera, A. Gómez-Vázquez y A. J. Lozano-del Río (2014) Diversidad morfológica de poblaciones de maíces nativos (*Zea mays* L.) del estado de Tabasco, México. *Revista FCA UNCUYO* 46:239-247.
- Hernández X. E. y G. Alanís F. (1970) Estudio morfológico de cinco nuevas razas de maíz de la Sierra Madre Occidental de México: implicaciones filogenéticas y fitogeográficas. *Agrociencia* 5:3-30.
- Herrera-Cabrera B. E., F. Castillo-González, J. J. Sánchez-González, J. M. Hernández-Casillas, R. A. Ortega-Pazcka y M. Major-Goodman (2004) Diversidad del maíz Chalqueño. *Agrociencia* 38:191-206.
- Hortelano S. R. R., A. Gil M., A. Santacruz V., H. López S., P. A. López y S. Miranda C. (2012) Diversidad fenotípica de maíces nativos del altiplano centro-oriente del estado de Puebla, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:97-109, <https://doi.org/10.35196/rfm.2012.2.97>
- Lobo B. M., C. M. Torres C., J. R. Fonseca, L. A. M. P. de Melo, R. B. Alves and T. Abadie (2003) Characterization of germplasm according to environmental conditions at the collecting site using GIS: Two case studies from Brazil. *Plant Genetic Resources Newsletter* 135:1-11.
- López R. G., A. Santacruz V., A. Muñoz O., F. Castillo G., L. Córdova T. y H. Vaquera H. (2005) Caracterización morfológica de poblaciones nativas de maíz del Istmo de Tehuantepec, México. *Interciencia* 30:284-290
- Muñoz O. A. (2005) Centli Maíz. Prehistoria e Historia, Diversidad, Potencial, Origen Genético y Geográfico. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 210 p.
- Murtagh F. and P. Legendre (2014) Ward's hierarchical agglomerative clustering method: which algorithms implement ward's criterion? *Journal of Classification* 31:274-295, <https://doi.org/10.1007/s00357-014-9161-z>
- Oliboni R., M. V. Faria, M. Neumann, G. M. Battistelli, R. G. Tegoni and J. T. V. de Resende (2012) Genetic divergence among maize hybrids and correlations with heterosis and combining ability. *Acta Scientiarum Agronomy* 34:37-44, <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v34i1.11979>
- Ortega C. A., M. J. Guerrero H., R. E. Preciado O. y O. Cota A. (2013a) Razas de maíz: relaciones filogenéticas y geográficas. *In: Diversidad y Distribución del Maíz Nativo y sus Parientes Silvestres de México*. A. Ortega C., M. J. Guerrero H. y R. E. Preciado O. (eds.). Printing Arts México. México. D. F. pp:21-43.
- Ortega C. A., M. J. Guerrero H., J. M. Hernández C., R. E. Preciado O., V. A. Vidal M., N. O. Gómez M., ... y F. Rincón S. (2013b) Diversidad y distribución de los maíces nativos en México. *In: Diversidad y Distribución del Maíz Nativo y sus Parientes Silvestres en México*. A. Ortega C., M. J. Guerrero H. y R. E. Preciado O. (eds.). Printing Arts México. México. D. F. pp:45-171.
- Ortega-Villegas M. N., L. Zizumbo-Villarreal, N. Monterroso-Salvatierra y O. G. Hernández-Lara (2018) Leyes de semillas y maíz transgénico. Análisis desde la co-producción entre ciencia y regímenes económico-políticos en México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 15:413-442, <https://doi.org/10.22231/asyd.v15i3.854>
- Rocandio-Rodríguez M., A. Santacruz-Varela, L. Córdova-Téllez, H. López-Sánchez, F. Castillo-González, R. Lobato-Ortiz, ... y R. Ortega-Pazcka (2014) Caracterización morfológica y agronómica 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>
- Ron P. J., J. J. Sánchez G., A. A. Jiménez C., J. A. Carrera V., J. G. Martín L., M. M. Morales R., ... y J. G. Rodríguez F. (2006) Maíces nativos del occidente de México. I. Colectas de 2004. *Scientia-CUCBA* 8:1-139.
- Ruiz C. J. A., N. Durán P., J. J. Sánchez G., J. Ron P., D. R. González E., J. B. Holland and G. Medina G. (2008) Climatic adaptation and ecological descriptors of 42 Mexican maize races. *Crop Science* 48:1502-1512, <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.09.0518>
- Ruiz C. J. A., J. M. Hernández C., J. J. Sánchez G., A. Ortega C., G. Ramírez O., M. J. Guerrero H., ... y L. de la Cruz L. (2013a) Ecología, Adaptación y Distribución Actual y Potencial de las Razas Mexicanas de Maíz. Libro Técnico Núm. 5. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, INIFAP. Tepatitlán de Morelos, Jalisco. 159 p.
- Ruiz C. J. A., A. Ortega C., G. Ramírez O., M. J. Guerrero H. y J. J. Sánchez G. (2013b) Distribución actual y potencial de las razas Mexicanas de maíz. *In: Diversidad y Distribución del Maíz Nativo y sus Parientes Silvestres en México*. A. Ortega C., M. J. Guerrero H. y R. E. Preciado O. (eds.). Printing Arts México. México, D. F. pp:172-208.
- SAGARPA-INIFAP-SENASICA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Alimentaria (2015) Maíz punta de riego. *In: Agenda Técnica Agrícola Guanajuato*. Segunda edición. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D. F. pp:225-232.
- SAGARPA-SNICS, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (2014) Maíz (*Zea mays* L.). Guía Técnica para la Descripción Varietal. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. Tlalnepantla, Estado de México. 39 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12433.22883>
- SAS Institute (2007) The SAS System for Windows Microsoft. Guide for Personal Computer. SAS/STAT ver. 9.1.3. SAS Institute, Inc. Cary, North Carolina, USA. 212 p.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2020) Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Mayo 2020).
- Stevenson J. C. and M. M. Goodman (1972) Ecology of exotic races of maize. I. Leaf number and tillering of 16 races under four temperatures and two photoperiods. *Crop Science* 12:864-868, <https://doi.org/10.2135/cropsci1972.0011183X001200060045x>

Tapia C., E. Torres and M. Parra-Quijano (2015) Searching for adaptation to abiotic stress: ecogeographical analysis of highland Ecuadorian maize. *Crop Science* 55:262-274, <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.12.0813>

Yan J., M. Warburton and J. Crouch (2011) Association mapping for enhancing maize (*Zea mays* L.) genetic improvement. *Crop Science* 51:433-449, <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.04.0233>