

VARIABILIDAD AGROMORFOLÓGICA ENTRE POBLACIONES DE MAÍZ AZUL Y ROJO DE LA MIXTECA OAXAQUEÑA, MÉXICO

Agromorphological variability among blue and red populations of maize from the Mixteca, Oaxaca, Mexico

Francisco Torres-Escamilla¹, José Luis Chávez-Servia^{1*}, Prisciliano Diego-Flores¹ y José Cruz Carrillo-Rodríguez²

¹CIIDIR-Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional. Hornos 1003, Col. Noche Buena, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, C.P. 712030. ²Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, Exhacienda Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca.

*Autor para correspondencia: jchavez@ipn.mx

Resumen

Las variedades locales de maíz siguen evolucionando bajo domesticación en terrenos de pequeños agricultores, y están influenciadas por factores socioeconómicos, bióticos y abióticos. En este contexto, el objetivo fue describir y clasificar los patrones de variación fenotípica de una colección de poblaciones de maíces de grano azul y rojo originarias de la Mixteca alta oaxaqueña, México, con base en caracteres fisiológicos, de planta, espiga, mazorca y grano. Se hizo una colecta y caracterización por separado de 32 muestras poblacionales de maíz azul y 18 de grano rojo, ambas en un diseño de bloques al azar, mediante veinte variables agromorfológicas. Se determinaron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre poblaciones de maíz azul y rojo, en caracteres de planta, espiga, mazorca y grano. La colección de maíces azules presentó una alta variabilidad en todos los caracteres no así la colección de grano rojo, las que fueron más homogéneas en caracteres de espiga, longitud y diámetro de mazorca y dimensiones de grano. En ambos casos los patrones de variación fenotípica dependen de altura de planta y mazorca, días a floración masculina o

femenina, y número de ramas en espiga, y tienden a generar patrones de agrupamiento según el origen de las poblaciones. En la colección de maíces azules se determinaron tres grupos significativamente diferentes y varían en altura de planta y mazorca, descripción de espiga, ancho y grosor de grano. Las poblaciones de grano rojo se agruparon en tres grupos fenotípicos y se diferenciaron en días a floración masculina o femenina, altura de planta y mazorca y caracteres de mazorca y olote.

Palabras clave: Adaptación local, intercambio de semillas, diversidad fenotípica, análisis multivariante, agricultura indígena.

Abstract

Local varieties of corn continue to evolve as a result of land parcel domestication by small farmers. These varieties are also influenced by socio-economic, biotic and abiotic factors. Under this context, the objective of this paper is to describe and classify patterns of phenotypical variations found in the physiological

characteristics of the plant, tassel, ear, and seed from samples of blue and red corn populations originating from the mixteca regions in Oaxaca, Mexico. Thirty-two samples of blue corn and eighteen of red corn were collected and characterised. Both types were taken from random land parcels using twenty agromorphological variables. Significant differences were found ($P < 0.05$) between the red and blue populations with regards to the plant, tassel, ear, and seed. The blue corn sample presented high variations in all characteristics, unlike the red corn, which displayed more homogenous characteristics in the tassel, length and diameter of the ear and dimensions of the seed. In both cases, the patterns of phenotypical variation are linked to plant and ear height, duration of masculine or feminine flowering days and density of stalks on the tassel. Varieties tend to generate grouping patterns according to the origin of the populations. Three significantly different groups were determined in the sample of blue corn. They differed in plant and ear height, tassel description, seed width and thickness. The red grain populations were grouped according to three phenotypes and they differed in duration of masculine and feminine flowering days, plant and ear height and characteristics of ear and cob.

Keywords: Local adaptation, seed exchange, phenotypic diversity, multivariate analysis, indigenous agriculture.

Introducción

El maíz es uno de los principales cultivos de distribución mundial, y en México se cultivan 7.34 millones de hectáreas, 78.5% del total se siembra en

condiciones de temporal y en mayor proporción corresponde a la parcelas de los pequeños agricultores tradicionales como en Guerrero, Oaxaca y Chiapas, donde la proporción de temporal oscila de 90.8 a 98.1%, y son sembradas esencialmente con variedades nativas locales o variedades de los agricultores (Herrera-Cabrera *et al.*, 2000; SIAP, 2019). El bajo uso de variedades mejoradas obedece, entre otras causas, a decisiones de agricultores para preservar sus poblaciones nativas principalmente de granos pigmentados y también porque los programas públicos y privados de mejoramiento genético de maíz generan solo variedades de grano blanco y algunas de amarillo, y no son prioridad azules o rojos. En años recientes ha cobrado interés mejorar las poblaciones de maíz azul y en baja o mínima proporción de grano rojo (Arellano *et al.*, 2003; Urias-Peraldi *et al.*, 2013; Arellano *et al.*, 2014).

En el centro y sureste de México, los agricultores tradicionales conservan una gran diversidad de poblaciones nativas de maíz, las que difieren en formas, tamaños y coloraciones de grano, mazorca, altura de planta, tiempo de siembra a floración, madurez fisiológica y de cosecha, entre otros caracteres. Esa diversidad o heterogeneidad poblacional es parte de las opciones productivas y resilientes que utilizan los productores para sortear la variabilidad climática y edáfica que se presentan en los nichos agroecológicos de producción, y es la materia prima alimentaria para variar la dieta familiar; algunas formas, texturas, dureza y colores de grano están relacionados con la preparación de platillos específicos (Hernández-Xolocotzi, 1985; Cázares-Sánchez *et al.*, 2005; Tuxill, 2005; Pool, 2007; Chambers y Henshall, 2007; Camacho-Villa, 2011).

Los maíces de grano pigmentado han despertado interés en tecnología de alimentos, nutraceutica, farmacología y salud. Los de grano azul poseen antocianinas y carotenos en el endospermo, aleurona y cutícula, los que confieren alta actividad antioxidante y propiedades funcionales para disminuir colesterol, reducir riesgos para adquirir cáncer, enfermedades coronarias, son antitumorales, antiinflamatorios y antidiabético (Stintzing y Carle, 2004; Mazza, 2007; Aguilera-Ortíz *et al.*, 2011; López-Martínez y García-Galindo, 2009; López-Martínez *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2010; Alarcón-Aparicio *et al.*, 2010; Guzmán-Gerónimo *et al.*, 2011; Alarcón-Aparicio *et al.*, 2011; Zilic *et al.*, 2012; Castillo-Nonato y Chávez-Mejía, 2013).

Arellano *et al.* (2003) evaluaron agronómicamente 88 poblaciones de grano azul y 12 de grano rojo, originarias de los Valles Altos de Guanajuato, Querétaro, México, Tlaxcala y Puebla, determinaron potenciales de rendimiento de 5.6 a 6.6 ton ha⁻¹, lo que indican que tienen igual potencial de rendimiento que los de grano blanco. Espinosa-Trujillo *et al.* (2010) evaluaron la aptitud combinatoria general y específica de algunas poblaciones nativas de maíz azul, y determinaron que la coloración azul y roja se acrecentó a medida que se combinan poblaciones con mayor intensidad de color. Por esta circunstancia, los agricultores manejan y siembran sus maíces de grano azul o rojo en parcelas independientes con el objetivo de mantener la pureza de sus poblaciones y en consecuencia, la selección se hace en pigmentados, con base en color del pericarpio y/o aleurona del grano, aun cuando se conjugan otros caracteres como precocidad o altura de planta (Espinosa-Trujillo *et al.*, 2009).

En Oaxaca se presenta una dinámica poblacional y evolución bajo domesticación del maíz, y se requiere entender los patrones de variación genotípica y fenotípica en poblaciones de grano azul y rojo como marcadores naturales, y con casi nulo mejoramiento genético formal y solo con presiones de selección agroecológicas e impuestas por el agricultor. Así, en una colecta realizada por Aragón *et al.* (2006), de un total de 1,818 muestras, solo 10.5 y 3.6 % correspondían a poblaciones de grano azul y rojo o naranja. En la Mixteca alta, Chávez y Diego (2011), en una muestra de 116 hogares visitados, determinaron que la siembra de maíz rojo y azul representan 17.8 y 20.2% de la superficie total sembrada, respectivamente. En este contexto, se planteó el objetivo de describir y clasificar los patrones de variación fenotípica de una colección de poblaciones de maíces de grano azul y rojo originarias de la Mixteca alta oaxaqueña, con base en caracteres fisiológicos, de planta, espiga, mazorca y grano.

Materiales y métodos

Colecta de muestras poblacionales

Se colectaron 50 muestras poblacionales de maíz pigmentado (32 de grano azul y 18 de grano rojo) de enero a marzo de 2011, en 22 agencias y comunidades de los municipios de San Miguel El Grande, San Esteban Atlatlahuca, Chalcatongo de Hidalgo, Santiago Yosondua, Santa Catarina Yosonotu y Guadalupe Victoria del distrito de Tlaxiaco, Oaxaca, México. Las comunidades y municipios donde se realizó la colecta, se ubican geográficamente entre 16° 56' 47" y 17° 3' 40" LN, y de 97° 31' 22" a 97° 43' 45" LO, a una altitud de 2020 a 2660 msnm. El clima es templado subhúmedo

con oscilaciones térmicas de 16 a 22 °C y precipitaciones anuales de 550 a 2,177 mm (García, 1988). Durante la colecta se integró una base de datos pasaporte con información de: nombre del agricultor donante y georeferenciación de localidad (Cuadro 1).

Caracterización agromorfológica

Con el objetivo de describir la variabilidad fenológica y agromorfológica de la colección de maíz azul y rojo, se estableció un experimento por grupos de color de grano en la comunidad de Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán, (97° 22' 55" LN, 17° 33' 22" LO, y 2380 msnm) durante el ciclo primavera-verano de 2011, en terrenos de un agricultor. En campo se sembraron bajo un diseño de bloques

completos al azar dos experimentos, uno con las colectas de grano azules (32) y otra de grano rojo (18), con cinco y seis repeticiones, respectivamente. La siembra fue de manera tradicional con una parcela experimental de dos surcos separados a 0.8 m y 5 m de longitud. En cultivo se aplicó la fórmula de fertilización 120-90-60 (nitrógeno-fósforo-potasio) y el manejo del experimento se hizo de manera convencional. Se utilizaron 20 variables descriptivas de planta, fisiológicas, espiga, mazorca y grano con base en las propuestas de Sánchez-G *et al.* (1993), Herrera-Cabrera *et al.* (2000) y Sánchez *et al.* (2000). Se agregó la variable rendimiento de grano ajustado por número de plantas y mazorcas por parcela experimental, proporción de peso grano/olote y 14% de humedad del grano

Cuadro 1. Origen de las colectas poblacionales de maíz azul y rojo, en el distrito de Tlaxiaco, Oaxaca, México.

Colecta ¹	Origen de la muestra (agencia, municipio)	Altitud (m)	Latitud N	Longitud O
A-01	Independencia, Chalcatongo de Hidalgo	2440	17° 02' 07"	97° 35' 14"
A-02	Abasolo, Chalcatongo de Hidalgo	2580	16° 59' 17"	97° 33' 34"
A-03	Reforma, Chalcatongo de Hidalgo	2640	16° 56' 47"	97° 31' 22"
A-04	Imperio, Santiago Yosondúa	2280	16° 58' 43"	97° 38' 24"
A-05	Aldama, Chalcatongo de Hidalgo	2240	16° 57' 53"	97° 35' 50"
A-06	Chapultepec, Chalcatongo de Hidalgo	2520	16° 58' 57"	97° 34' 40"
A-07	Benito Juárez, San Miguel El Grande	2200	17° 00' 17"	97° 37' 43"
A-08	Progreso, Chalcatongo de Hidalgo	2460	17° 02' 40"	97° 34' 12"
A-09	Progreso, Chalcatongo de Hidalgo	2460	17° 02' 40"	97° 34' 12"
A-10	Iturbide, San Miguel El Grande	2480	17° 03' 40"	97° 35' 22"
A-11	Hidalgo, San Miguel El Grande	2500	17° 04' 25"	97° 35' 38"
A-12	Guadalupe Victoria, San Miguel El Grande	2480	17° 04' 08"	97° 36' 37"
A-13	Francisco I. Madero, San Miguel El Grande	2300	17° 02' 07"	97° 38' 12"
A-14	Benito Juárez, San Esteban Atlatlahuca	2400	17° 02' 38"	97° 38' 50"
A-15	Ignacio Zaragoza, San Miguel El Grande	2500	17° 02' 02"	97° 36' 18"
A-16	Ignacio Zaragoza, San Miguel El Grande	2500	17° 02' 02"	97° 36' 18"
A-17	Morelos, San Miguel El Grande	2620	17° 03' 40"	97° 37' 38"
A-18	Santa Catarina Yosonotú	2260	17° 01' 10"	97° 39' 40"
A-19	San Esteban Atlatlahuca	2450	17° 03' 55"	97° 40' 38"
A-20	Ignacio Zaragoza, San Miguel El Grande	2500	17° 02' 02"	97° 36' 18"
A-21	Morelos, San Miguel El Grande	2620	17° 03' 40"	97° 37' 38"
A-22	Morelos, San Miguel El Grande	2620	17° 03' 40"	97° 37' 38"
A-23	El Ojite, Tlaxiaco	2020	17° 12' 41"	97° 43' 45"
A-24	San Esteban Atlatlahuca	2450	17° 03' 55"	97° 40' 38"
A-25	Independencia, Chalcatongo de Hidalgo	2440	17° 02' 07"	97° 35' 14"
A-26	Cañada Morelos, Chalcatongo de Hidalgo	2360	16° 58' 30"	97° 36' 58"
A-27	Cañada Morelos, Chalcatongo De Hidalgo	2360	16° 58' 30"	97° 36' 58"

A-28	Vicente Guerrero, San Miguel El Grande	2500	17° 01' 40''	97° 36' 57''
A-29	San Miguel El Grande	2480	17° 02' 45''	97° 37' 10''
A-30	Vicente Guerrero, San Miguel El Grande	2500	17° 01' 40''	97° 36' 57''
A-31	Guerrero Grande, San Esteban Atlatlahuca	2520	17° 02' 42''	97° 41' 32''
A-32	San Miguel El Grande	2480	17° 02' 45''	97° 37' 10''
R-01	Independencia, Chalcatongo de Hidalgo	2440	17° 02' 07''	97° 35' 14''
R-02	Allende, Chalcatongo de Hidalgo	2660	16° 58' 10''	97° 32' 17''
R-03	Imperio, Santiago Yosondúa	2280	16° 58' 43''	97° 38' 24''
R-04	Progreso, Chalcatongo de Hidalgo	2460	17° 02' 40''	97° 34' 12''
R-05	Francisco I. Madero, San Miguel El Grande	2300	17° 02' 07''	97° 38' 12''
R-06	Francisco I. Madero, San Miguel El Grande	2300	17° 02' 07''	97° 38' 12''
R-07	Benito Juárez, San Esteban Atlatlahuca	2400	17° 02' 38''	97° 38' 50''
R-08	Benito Juárez, San Miguel El Grande	2200	17° 00' 17''	97° 37' 43''
R-09	Vicente Guerrero, San Miguel El Grande	2500	17° 01' 40''	97° 36' 57''
R-10	Ignacio Zaragoza, San Miguel El Grande	2500	17° 02' 02''	97° 36' 18''
R-11	Yucunicuca, Santa Catarina Yosonotú	2400	16° 58' 43''	97° 38' 24''
R-12	Morelos, San Miguel El Grande	2620	17° 03' 40''	97° 37' 38''
R-13	Guerrero Grande, San Esteban Atlatlahuca	2520	17° 02' 42''	97° 41' 32''
R-14	Benito Juárez, San Esteban Atlatlahuca	2400	17° 02' 38''	97° 38' 50''
R-15	Benito Juárez, San Miguel El Grande	2200	17° 00' 17''	97° 37' 43''
R-16	Cañada Morelos, Chalcatongo de Hidalgo	2360	16° 58' 30''	97° 36' 58''
R-17	Vicente Guerrero, San Miguel El Grande	2500	17° 01' 40''	97° 36' 57''
R-18	San Miguel El Grande	2480	17° 02' 45''	97° 37' 10''

¹Prefijo A = grano azul y R = grano rojo

Análisis estadísticos

A partir del registro de variables por colecta en cada parcela experimental, se integró una base de datos y se hicieron análisis de varianza mediante el modelo lineal de bloques completos al azar para evaluar las diferencias entre colectas. Posteriormente, con los promedios estandarizados por colecta, sin considerar rendimiento de grano, se desarrolló un análisis de componentes principales por el método de varianzas y covarianzas para determinar las variables de mayor valor descriptivo de la varianza total. Después, a partir de las variables de mayor valor descriptivo, se hizo un análisis de agrupamiento jerárquico por el método de la media no ponderada (UPGMA, acrónimo en inglés). Finalmente, con la clasificación de colectas por grupos en el análisis de agrupamiento, se evaluaron la diferencias entre grupos mediante un análisis de varianza y comparaciones de medias entre grupos por el método de Tukey ($P \leq 0.05$). Todos los análisis se

hicieron con el paquete estadístico SAS (1999).

Resultados y discusión

Variación y clasificación fenotípica en poblaciones de grano azul

En el análisis de varianza se determinó que existe diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre colectas para todas las variables evaluadas, excepto peso de mil granos (Cuadro 2). Esto último indica que las colectas tiene un mismo tipo de grano, todas las variantes poblacionales son de granos cristalinos a duros, y visualmente no se observaron granos harinosos. La diferenciación de comportamiento de las poblaciones se reflejó en el análisis de varianza y aportó elementos para señalar que, fenotípicamente existe una alta variación entre colectas del mismo color de grano en caracteres de planta, días a floración, espiga, mazorca, grano y rendimiento.

Cuadro 2. Significancia de cuadrados medios del análisis de varianza y variación en caracteres de planta, fisiológicos, espiga, mazorca, grano y rendimiento en maíz azul de la Mixteca oaxaqueña.

Caracteres descriptivos evaluados	Cuadrado Medio	Mín.	Máx.	Media	CV (%)
Altura de planta (m)	2.29**	1.94	3.10	2.6	11.0
Altura de mazorca (m)	1.56**	0.98	1.94	1.5	16.2
Número de ramas primarias en la espiga	2.78**	1.7	3.1	2.5	24.2
Número de ramas secundarias en la espiga	2.38**	1.1	1.9	1.6	28.0
Longitud de la parte ramificada de la espiga (cm)	2.43**	1.9	3.2	2.5	20.3
Longitud de pedúnculo en la espiga (cm)	1.67**	3.7	4.4	4.1	15.4
Longitud total de espiga (cm)	263.30**	29.2	40.0	36.5	14.1
Días a floración masculina	96.37**	78.0	99.0	87.1	6.2
Días a floración femenina	139.17**	81.3	106.2	93.8	6.3
Longitud de mazorca (cm)	38.44**	11.1	15.3	13.3	13.1
Diámetro la mazorca (cm)	1.47**	4.0	4.8	4.3	8.6
Número de hileras en la mazorca	19.82**	11.6	14.6	13.3	15.4
Número de granos por hilera	161.84**	22.7	30.7	27.0	16.1
Diámetro de olote (mm)	2.08**	1.6	2.6	2.2	11.1
Diámetro de raquis (mm)	0.78**	0.8	1.3	1.0	18.9
Longitud de grano (mm)	0.01*	12.5	15.0	13.8	6.7
Ancho de grano (mm)	0.01**	7.8	9.9	8.9	7.6
Grosor de grano (mm)	<0.01*	4.3	5.0	4.6	7.7
Peso de 1000 granos (g)	2756.1 ^{ns}	294.8	410.2	341.8	13.0
Volumen de 1000 granos	5150.5**	387.0	532.0	453.0	9.4
Rendimiento (ton ha ⁻¹)	0.56**	4.73	12.27	8.7	15.4

^{ns}No significativo (P > 0.05); *significativo a P ≤ 0.05; **significativo a P ≤ 0.01; CV = coeficiente de variación.

En el análisis de componentes principales se determinó que, altura de planta y mazorca, número de ramas primarias, secundarias y longitudes de la parte ramificada y del pedúnculo de la espiga, diámetro de raquis, olote y mazorca, fueron las variables de mayor valor explicativo de la varianza fenotípica total evaluada en 32 poblaciones de maíz azul (Figura 1). Al tercer componente principal se explicó 87.5% de la varianza total. Esto es, los caracteres descriptivos de planta, espiga y mazorca son relevantes para describir y diferenciar las poblaciones nativas de maíz azul que se cultivan en la

región comprendida por los municipios de Chalcatongo, San Miguel El Grande, San Esteban Atatlahuca, Santa Catarina Yosonotu y Santiago Yosondúa, Oaxaca.

En la Figura 1 se muestran diferentes patrones de variación fenotípica en función del origen de las colectas. Por ejemplo, las muestras de San Miguel El Grande se diferencian del resto por la variación en días a floración femenina, diámetro de olote y características de espiga principalmente. Esto hace que se ubiquen en el cuadrante I y III, en orden del movimiento de las manecillas del reloj.

En contraposición, las colectas originarias del municipio de Chalcatongo se localizan, esencialmente, en los cuadrantes II y III, y obedecen a la variabilidad de las características de espiga, altura de mazorca y planta. Es de resaltar que una muestra de San Miguel fue la más precoz (78 días a floración masculina), y en general las muestras de San Esteban fueron altas (> 2.7 m de altura de planta) y tardías (> 91 días a floración masculina).

Los resultados muestran que a través del tiempo, los agricultores conscientes y probablemente sin una selección sistemática, han generado divergencias fenotípicas y genotípicas en sus poblaciones, como se ha demostrado en otros trabajos sobre análisis de diversidad genética en poblaciones nativas (Pressoir y Berthaud, 2004a,b; Hayano-Kanashiro *et al.*, 2009; Rodríguez-Pérez *et al.*, 2012).

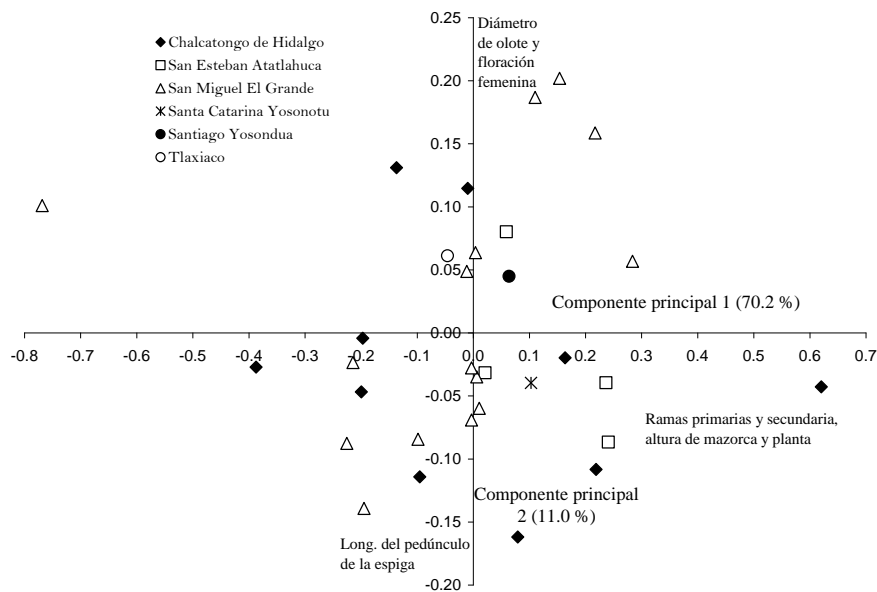


Figura 1. Dispersión de poblaciones de maíz azul, con base en los dos primeros componentes principales y por municipio de origen de colecta.

Los resultados aquí mostrados complementan los trabajos de Chávez-Servia *et al.* (2012), Chávez-Servia y Diego-Flores (2011) y Chávez-Servia *et al.* (2011) sobre la descripción de la variación fenotípica de las poblaciones de maíz en la Mixteca alta oaxaqueña, y los caracteres de planta, espiga, mazorca, grano y días a floración, son determinantes

en la diferenciación de la diversidad fenotípica de poblaciones nativas de maíz.

La variación fenotípica descrita, también es un reflejo del flujo genético mediado por el intercambio de semilla entre agricultores vecinos y por el movimiento de polen entre parcelas vecinas. En caso de pérdida de la cosecha, el agricultor recurre a sus vecinos, agricultores de otras comunidades y al mercado local para conseguir semilla para su siembra (Badstue *et al.*, 2006). Además, existen patrones de variación

determinados por la forma y tamaño de mazorca, altura de planta y características del grano que Benz (1986) y Aragón *et al.* (2006), clasificaron dentro de las razas Cónico, Mixteco, y Chalqueño, entre otras. Recientemente, Chávez-Servia *et al.* (2011) denominan a las variantes oaxaqueñas como “complejos raciales”, debido a que no es posible diferenciar fenotípicamente la pertenencia de cada una de las poblaciones a una raza en particular.

En el análisis de agrupamiento se determinaron tres grupos fenotípicos significativamente diferentes (pseudo F = 11.9, P < 0.05), con un coeficiente de determinación mayor a 0.9, (Figura 2). El grupo I, está constituido por 29 colectas que se caracterizaron por presentar plantas

de ciclo intermedio y porte medio, el que se separó en dos grandes subgrupos uno con espigas menos ramificadas (Ia) y otro (Ib) con espigas muy ramificadas y grandes. El grupo II se integró por dos colectas precoces a la floración y de porte bajo. Finalmente el grupo III se conformó por una de las colectas más tardías, de plantas altas, grano ancho y de alta densidad de grano (Figura 2 y Cuadro 3). El análisis de agrupamiento confirma que las características de planta, mazorca, grano y espiga son relevantes para diferenciar patrones fenotípicos de diversidad morfológica, la que está asociada con el origen municipal; Chalcatongo de Hidalgo, San Miguel El Grande, San Esteban Atlatlahuca, Tlaxiaco, Santiago Yosondua y Santa Catarina Yosonotu, Oaxaca.

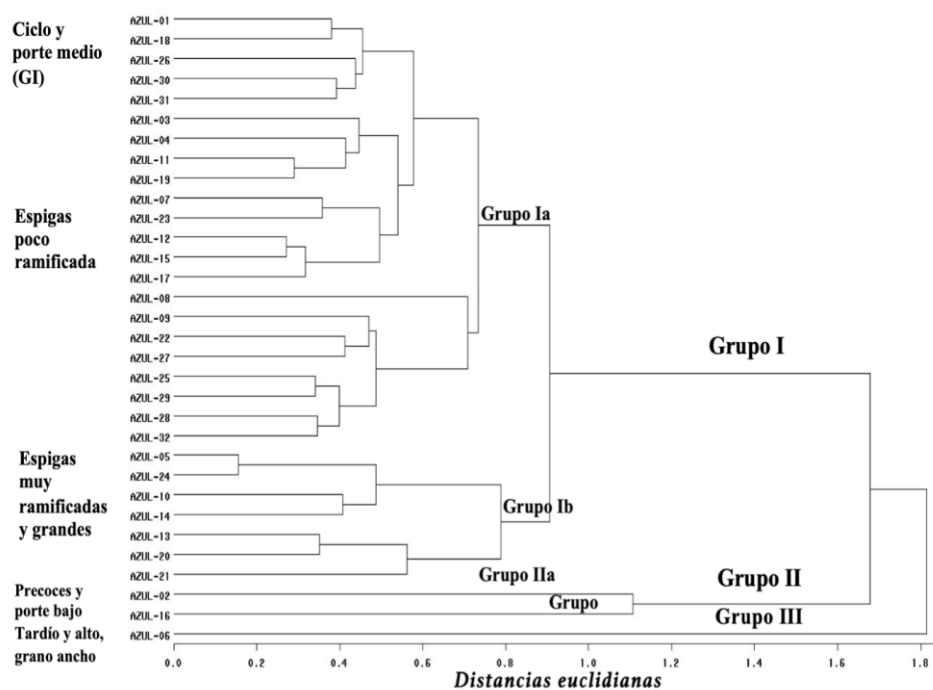


Figura 2. Dendrograma de agrupamiento jerárquico de muestras poblacionales de maíz Mixteco azul, con base en distancias euclidianas y caracteres agromorfológicos.

Cuando se realizó el análisis de varianza, se determinó que había una diferencia significativa entre grupos fenotípicos, en todas las variables evaluadas, excepto en diámetro de mazorca, número de hileras, diámetro de olote y raquis, longitud de grano y peso de mil granos. Las diferencias en rendimiento entre grupos también fueron estadísticamente significativas (Cuadro 3).

La variación fenotípica distintiva entre grupos mostró una asociación directa entre días a floración masculina y femenina con relación a la altura de mazorca y planta. El grupo II presentó

porte bajo, de 1.9 a 2.2 m en altura de planta, 1.0 a 1.1 m en altura de mazorca y de 78 a 85 días a floración masculina y femenina. En el grupo I se registró un comportamiento intermedio con promedios dentro de un intervalo de 86.9 a 98.1 días a floración masculina y femenina, altura de mazorca de 1.4 a 1.6 m y de 2.6 a 2.8 m en altura de planta. En contraste, el grupo III fue tardío a la floración con promedios de 97.6 a 106.2 días, hasta 1.9 m y 3.1 m en altura de mazorca y planta, respectivamente (Cuadro 3).

Cuadro 3. Diferencias entre grupo fenotípicos con base en caracteres de planta, fenológicas, mazorca, grano, espiga y rendimiento de grano en maíz azul nativo de Oaxaca.

Variables evaluadas	Sign. de F ¹	Grupos fenotípicos (Figura 3)				
		Ia (22)	Ib (7)	IIa (1)	IIb (1)	III (1)
Días a floración masculina	**	86.9 b ²	91.1 b	80.8 c	78.0 c	97.6 a
Días a floración femenina	**	92.2 b	98.1 b	85.0 c	81.3 c	106.2 a
Altura de planta (m)	**	2.6 b	2.8 b	2.2 c	1.9 c	3.1 a
Altura de mazorca (m)	**	1.4 b	1.6 b	1.1 c	1.0 c	1.9 a
Long. parte ramificada de espiga (cm)	**	17.4 a	16.5 a	18.3 b	14.8 b	14.4 c
Número de ramas primarias en la espiga	**	6.4 b	7.4 b	4.6 c	3.7 c	10.6 a
Núm. de ramas secundarias en la espiga	**	36.2 b	38.1 b	31.9 c	29.2 c	38.4 a
Long. de pedúnculo en la espiga (cm)	**	6.6 b	8.1 b	4.8 b	3.0 b	10.0 a
Longitud total de espiga (cm)	**	1.7 a	2.1 a	1.1 b	0.1 b	3.2 a
Longitud de mazorca (cm)	**	13.2 a	14.0 a	12.5 b	11.1 b	14.3 a
Diámetro de mazorca (cm)	ns	4.3 a	4.5 a	4.2 a	4.2 a	4.2 a
Número de hileras por mazorca	ns	13.2 a	13.5 a	14.0 a	13.0 a	13.0 a
Núm. granos por hilera en la mazorca	**	26.9 a	27.7 a	24.3 b	22.7 b	29.6 a
Diámetro de olote (mm)	ns	2.1 a	2.4 a	2.1 a	1.8 a	2.2 a
Diámetro de raquis (mm)	ns	1.0 a	1.2 a	1.0 a	0.9 a	1.1 a
Longitud de grano (mm)	ns	13.8 a	13.6 a	13.7 a	15.1 a	13.7 a
Ancho de grano (mm)	**	8.8 a	9.1 a	8.1 b	7.8 b	8.9 a
Grosor de grano (mm)	**	4.6 a	4.7 a	5.1 a	4.5 a	4.4 b
Peso de 1000 granos (g)	ns	337.4 a	363.9 a	320.2 a	307.7 a	306.8 a
Volumen de 1000 granos (ml)	**	450.7 a	473.9 a	411.4 a	441.7 a	387.0 b
Rendimiento (ton ha ⁻¹)	**	8.6 a	9.2 a	6.4 b	4.7 b	10.9 a

¹Significancia del valor de F, ns = no significativo ($P \leq 0.05$) y ** = significativo a $P \leq 0.01$; ²En hilera, medias con la misma letra no son significativamente diferentes (prueba de Tukey, $P \leq 0.05$).

El grupo precoz y de porte bajo (II) también presentó los valores menores en número de ramas primarias y secundarias de la espiga, longitud de espiga y mazorca, granos por hilera, ancho de grano y rendimiento. El grupo I se distinguió por presentar un número intermedio de ramas primarias (6.4 a 7.4) y secundarias (36.2 a 38.1), y difiere significativamente del grupo III en valores mayores en ramas primarias (10.6) y secundarias (38.4). Por otra parte, las principales características del grupo III, fueron una menor longitud de la parte ramificada (14.4 ramas), menor grosor de grano (4.4 mm) y consecuentemente bajo volumen de 1000 granos (387 mL), Cuadro 3.

Variación y clasificación fenotípica en poblaciones de grano rojo

Entre poblaciones de maíz de grano rojo se detectaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en altura de planta y mazorca, número de ramas primarias de la espiga, días a floración masculina y femenina, número de granos por hilera en la mazorca, diámetros de olote y raquis. En este caso, entre 18 poblaciones de maíz no hubo diferencias en rendimiento, características de grano, mazorca y espiga (Cuadro 4). Esto indica, que hay poblaciones fenotípicamente similares y reducida variabilidad fenotípica representada en la colección evaluada. También es importante destacar que, los maíces de grano rojo se encuentran en baja frecuencia en la Mixteca tal como evidenciaron Chávez y Diego (2011) y Aragón *et al.* (2006). En consecuencia, los resultados también sugieren que las

poblaciones de grano rojo están amenazadas por reemplazamiento, ya que regionalmente se privilegia el cultivo de maíz blanco como consecuencia de la facilidad en la venta y en este trabajo los patrones tienden a la homogeneidad fenotípica de maíces rojos porque no se distinguen diferencias en 13 de 21 caracteres evaluados a pesar de que tienen diferentes orígenes geográficos.

La variación fenotípica detectada entre las poblaciones respecto a altura de mazorca (de 1.2 a 1.84 m) y planta (2.34 a 3.05 m) y días a floración masculina (83.0 a 96.3 días) y femenina (87.7 a 102.5 días), muestra que el ambiente de la región de origen de las colectas (p. ej. estacionalidad corta de lluvias y presencia de heladas) ha ejercido una presión de selección natural y también la selección por caracteres de mazorca que hacen año con año los agricultores, antes de la siembra, han modificado la poblaciones cultivadas (Cuadro 4). En campo es notoria la diferencia entre poblaciones de ciclo corto y porte bajo, en relación a las de ciclo largo y altura intermedia o tardía con porte alto. Esta modificación en los patrones de variación fenotípica y genética también se ha documentado en poblaciones de maíz de los Valles Centrales de Oaxaca (Soleri y Cleveland, 2001; Pressoir y Berthaud, 2004b). Además se ha demostrado que las presiones de selección que ejercen las condiciones climáticas son determinantes para diferenciar poblaciones entre y dentro de razas de maíz (Ruiz-Corral *et al.*, 2008; Mercer *et al.*, 2008).

Cuadro 4. Significancia de cuadrados medios del análisis de varianza y variación de 21 caracteres fenológico, morfológicos y rendimiento de grano de 18 poblaciones nativas de maíz rojo.

VARIABLES EVALUADAS	Cuadrado Medio	Mín.	Máx.	Media	CV (%)
Altura de planta (m)	2.66**	2.34	3.05	2.7	11.8
Altura de mazorca (m)	1.70**	1.20	1.84	1.4	16.9
Número de ramas primarias en la espiga	3.34**	2.4	3.4	2.7	23.4
Número de ramas secundarias en la espiga	0.26 ^{ns}	1.5	1.8	1.7	17.4
Longitud de la parte ramificada de la espiga (cm)	1.24 ^{ns}	2.5	3.0	2.7	19.6
Longitud del pedúnculo en la espiga (cm)	0.57 ^{ns}	3.6	4.1	3.9	17.2
Longitud total de espiga (cm)	143.5 ^{ns}	33.8	41.6	38.2	14.3
Días a floración masculina	86.25**	83.0	96.3	90.0	5.0
Días a floración femenina	105.4**	87.7	102.5	95.6	5.7
Longitud de mazorca (cm)	24.26 ^{ns}	12.4	14.8	13.8	13.9
Diámetro de mazorca (cm)	16.19 ^{ns}	3.1	6.9	4.4	8.4
Número de hileras en la mazorca	28.77 ^{ns}	11.6	15.4	13.1	15.2
Número de granos por hilera	146.9*	24.2	31.5	28.2	16.9
Diámetro de olote (mm)	0.91**	1.1	2.6	2.3	10.3
Diámetro de raquis (mm)	0.40**	0.9	1.3	1.1	18.2
Longitud de grano (mm)	0.90 ^{ns}	12.6	14.1	13.3	5.6
Ancho de grano (mm)	0.72 ^{ns}	8.4	10.0	9.0	7.2
Grosor de grano (mm)	0.21 ^{ns}	4.1	4.9	4.5	8.3
Peso de 1000 granos (g)	2388.4 ^{ns}	304.5	401.5	334.6	14.5
Volumen de 1000 granos (ml)	5099.1 ^{ns}	384.0	540.0	434.8	14.2
Rendimiento (ton•ha ⁻¹)	0.17 ^{ns}	4.7	7.8	6.4	15.2

^{ns}No significativo (P > 0.05); *significativo a P ≤ 0.05; **significativo P ≤ 0.01; C.V.= coeficiente de variación

Con base en las variables que mostraron diferencia significativa entre poblaciones, se hizo un análisis descriptivo de componentes principales (CP). La varianza explicada acumulada al tercer componente principal fue de 93.1%. En la Figura 3 se describe la dispersión de 18 poblaciones de grano rojo con base en la precocidad, altura de planta y mazorca, diámetro de olote y mazorca, número de ramas primarias en la espiga y número de granos por hileras en mazorca. Las muestras originarias de Chalcatongo, San Esteban y San Miguel presentaron una gran variación en relación a la altura de mazorca y planta y días a floración. Por ejemplo, tres muestras de San Miguel fueron altas y tardías pero también hubo

muestras de plantas bajas y precoces (proyección sobre el eje del CP1, Figura 3), patrón que se repite en algunas colectas de San Esteban y de Chalcatongo. Una muestra de San Esteban Atlatlahuca fue diferente a todas (parte inferior en el eje del CP2). Los resultados muestran que a pesar de similitudes en características de mazorca y grano en las poblaciones evaluadas, sus diferencias se detectan en caracteres de planta y espiga. De acuerdo con nuestras observaciones de campo, parte de las presiones de selección son las condiciones de cultivo; por ejemplo, se siembra solo en condiciones de temporal en San Esteban y San Miguel pero en Chalcatongo, Santiago y Santa Catarina a veces los maíces se siembran en el sistema

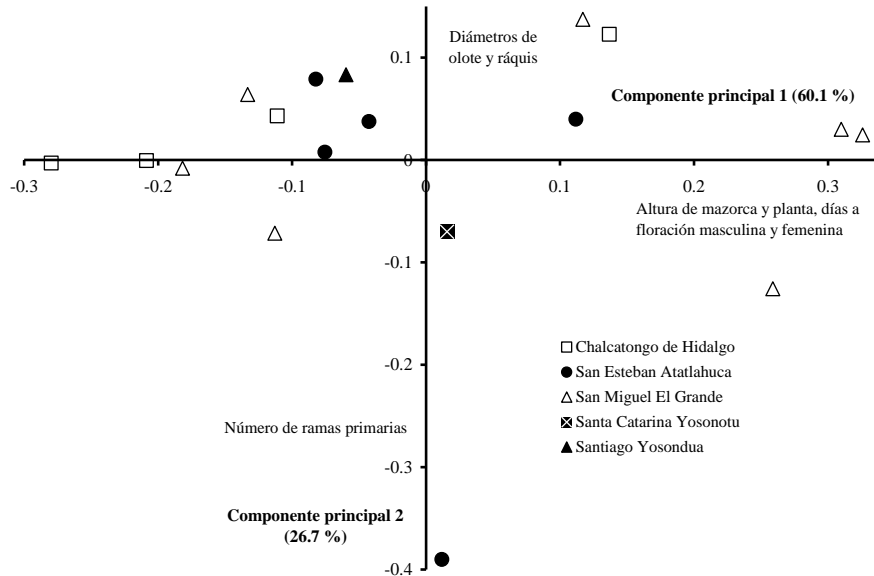


Figura 3. Dispersión de poblaciones de maíz de grano rojo en los dos primeros componentes principales, con base en el origen municipal de las poblaciones y diferentes caracteres fisiológicos y morfológicos.

de *cajete* (siembras tempranas de febrero a marzo) y con riego.

En el análisis de agrupamiento se determinaron tres grupos de variación fenotípica y con diferencias significativas (pseudof $F = 8.5$, $P < 0.05$). El grupo I se desagregó en dos subgrupos (Ia y Ib), el primero se integró por poblaciones con ciclo intermedio, porte intermedio de planta y espigas poco ramificadas, y el segundo se diferenció por espigas muy ramificadas y grandes, pero semejante al primero en días a floración y altura de planta.

El tercer grupo (III) se separó en dos subgrupos, el primero agrupó a dos poblaciones originarias de Chalcatongo y el segundo a una población de San Miguel, aunque ambos fueron tardíos y altos. Finalmente, el grupo II se integró por una población precoz y de porte bajo que fue colectada en el municipio de Chalcatongo (Figura 4). Estos resultados evidencian, con mayor precisión, los patrones de diferenciación fenotípica observados en el análisis de componentes principales descritos en la Figura 3.

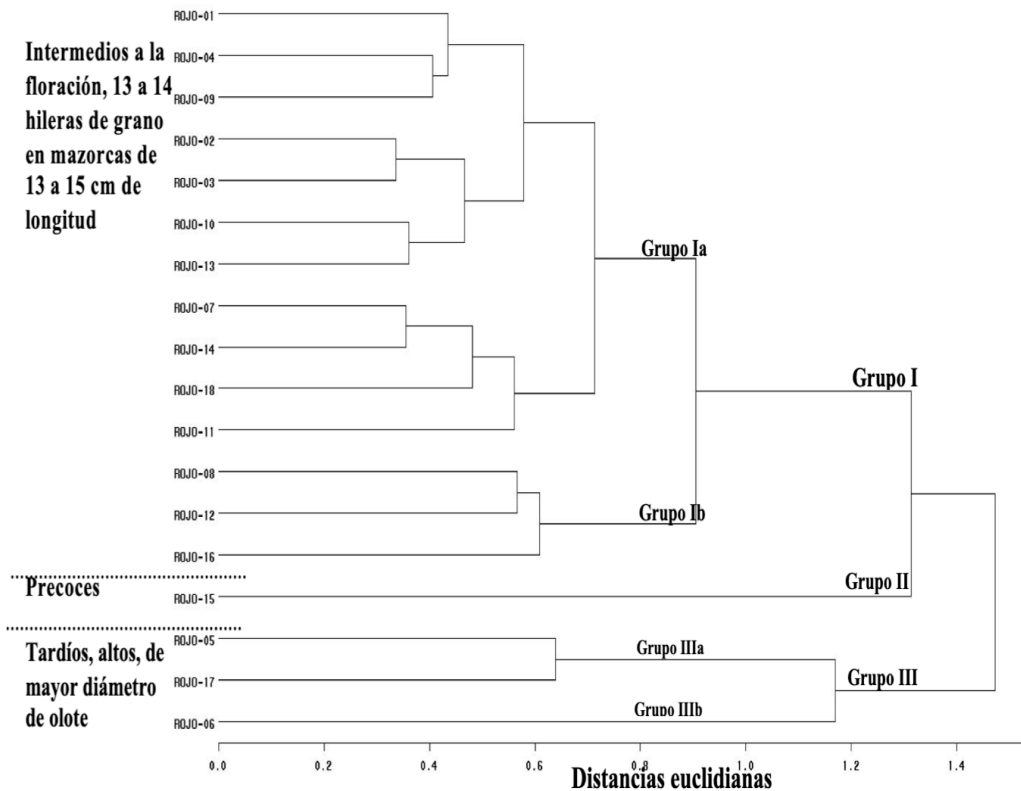


Figura 4. Dendrograma de agrupamiento jerárquico de poblaciones de maíz rojo de la Mixteca alta oaxaqueña, con base en caracteres fisiológicos y morfológicos de planta, espiga, mazorca y grano.

Un análisis de varianza permitió probar las diferencias entre grupos fenotípicos, y se determinó que para las variables número de ramas secundarias, longitud de pedúnculo y total de espiga, número de granos por hilera en la mazorca y grosor de grano, no hubo diferencias significativas entre grupos ($P > 0.05$), y las demás variables mostraron diferencias como altura de planta y mazorca, ramas primarias, días a floración, longitud y diámetro de mazorca y rendimiento, entre otras (Cuadro 5). Estos resultados dan cuenta de la diferenciación entre grupos más que dentro de grupos o bien que cada grupo es homogéneo pero diferente de otros. En otras palabras, la selección y

manejo que ejerce los agricultores en sus poblaciones de maíz han generado patrones fenotípicos diferenciales como ha sido documentado por Soleri y Cleveland (2001) en los Valles centrales de Oaxaca, Perales *et al.* (2003a y b) en el estado de México y Morelos, Louette *et al.* (1997) en Jalisco y Aguirre-Gómez *et al.* (2000) en Guanajuato.

En la comparación de medias entre grupos de maíces de grano rojo, se observó que el grupo I es semejante en altura de mazorca y planta al grupo II pero se diferencia en menor número de ramas primarias en la espiga (7 a 8), un tamaño de mazorca intermedio (13.6 a 14.5 cm en

longitud y 4.2 a 4.4 cm en diámetro), de 13.0 a 13.4 hileras de granos en la mazorca, y un diámetro de olote intermedio. El grupo I se diferenció en menor tamaño de mazorca (12.6 cm de largo, 4.0 cm de diámetro y 11.6 hileras de granos), menor diámetro de olote (2.0 cm) y raquis (0.9 cm), pero es más precoz a la floración masculina (85.3 días) y femenina (89.3 días). En el otro extremo se encuentra el grupo III, fue tardío a la floración masculina y femenina (93.1 a 96.3 días), mayor altura de planta (3.0 a 3.1 m) y mazorca (1.7 m), de olote grueso (2.4 a 2.6 cm de diámetro), mazorca de

mayor diámetro (4.4 a 6.9 cm) y mayor número de hileras de granos en la mazorca (12.7 a 15.4 hileras), (Cuadro 5). Los resultados muestran que las poblaciones cultivadas de maíz rojo en la región de Chalcatongo-Yosondua-Santa Catarina, evaluadas en este trabajo, se diferenciaron en tres grupos fenotípicos en relación al tiempo en alcanzar la floración masculina y femenina, altura de planta y mazorca, características de espiga, mazorca y olote, y con similar rendimiento de grano, experimentalmente de 5.9 a 7.8 ton ha⁻¹ (Cuadro 5).

Cuadro 5. Diferenciación fenotípica entre grupos de poblaciones de maíz rojo Mixteco, en caracteres de planta, fenológicos, espiga, grano, mazorca y rendimiento de grano.

Variables evaluadas	Sign. de F ¹	Grupos fenotípicos (Figura 5)				
		Ia (11)	Ib (3)	II (1)	IIIa (2)	IIIb (1)
Días a floración masculina	**	87.8 ab ²	95.1 ab	85.3 b	93.1 a	96.3 a
Días a floración femenina	**	93.4 ab	100.1 ab	89.3 b	100.6 a	102.0 a
Altura de planta (m)	**	2.5 b	2.9 b	2.4 b	3.0 a	3.1 a
Altura de mazorca (m)	**	1.3 b	1.6 b	1.3 b	1.7 a	1.7 a
Long. parte ramificada de la espiga (cm)	**	15.7 a	15.0 a	13.5 a	15.2 a	14.9 a
Número de ramas primarias de la espiga	**	7.1 b	7.6 b	8.2 a	9.1 a	8.5 a
Número de ramas secundarias en la espiga	ns	37.6 a	39.3 a	36.9 a	39.0 a	41.6 a
Longitud del pedúnculo de la espiga (cm)	ns	7.2 a	7.7 a	11.7 a	10.2 a	10.3 a
Longitud total de espiga (cm)	ns	1.8 a	2.0 a	2.1 a	2.2 a	2.2 a
Longitud de mazorca (cm)	*	13.6 ab	14.5 ab	12.6 b	14.6 a	14.2 a
Diámetro de mazorca (cm)	**	4.2 ab	4.4 ab	4.0 b	4.4 a	6.9 a
Número de hileras en la mazorca	**	13.0 ab	13.4 ab	11.6 b	12.7 a	15.4 a
Número de granos por hilera	ns	27.6 a	29.9 a	27.8 a	29.6 a	27.3 a
Diámetro de olote (cm)	**	2.3 b	2.3 b	2.0 c	2.4 a	2.6 a
Diámetro de raquis (cm)	**	1.1 a	1.2 a	0.9 b	1.2 a	1.3 a
Longitud de grano (mm)	ns	13.3 a	13.5 a	13.1 a	13.1 a	13.6 a
Ancho de grano (mm)	**	9.0 a	8.8 a	8.9 a	9.4 a	10.0 a
Grosor de grano (mm)	ns	4.5 a	4.5 a	4.3 a	4.5 a	4.6 a
Peso de 1000 granos (g)	*	327.6 a	327.1 a	324.3 a	359.2 a	401.5 a
Volumen de 1000 granos	**	424.4 a	422.5 a	425.0 a	467.8 a	540.0 a
Rendimiento (ton ha ⁻¹)	*	5.9 a	6.8 a	6.2 a	7.8 a	6.7 a

¹Significancia del valor de F, ns = no significativo (P > 0.05); * = significativo a P ≤ 0.05; ** = significativo a P ≤ 0.01;

²En hilera, medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, P < 0.05).

Los patrones de comportamiento poblacional de maíces nativos también han sido documentados en Valles Alto o Meseta Central de México; por ejemplo, por Carabaloso-Torrecilla *et al.* (2000), Miguel *et al.* (2004), Herrera-Cabrera *et al.* (2004) y Mijangos-Cortés *et al.* (2007) en poblaciones de la raza Chaqueño del Estado de México y Michoacán, Santa-Rosa *et al.* (2008 y 2012) en maíz del altiplano central de Puebla, y por Diego-Flores *et al.* (2012) en maíces de la Mixteca baja oaxaqueña. En general, se argumenta que las razas de maíces cultivados en el Altiplano Central de México se han adaptado a condiciones restrictivas de variaciones en la estación de lluvias o sequía, presencia de heladas y baja fertilidad de suelos, por lo que, poseen características y patrones particulares de variación genética y fenotípica (Sánchez-G *et al.*, 2000; Perales *et al.*, 2003b; Ruiz-Corral *et al.*, 2008; Mercer *et al.*, 2008; Kato *et al.*, 2009). Patrones que están ocurriendo en la evolución de maíces en la Mixteca oaxaqueña.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente trabajo, ponen en evidencia la diversidad de maíz que se puede encontrar en nuestro país. Una de las colecciones que posee mayor variabilidad en todos sus caracteres, es la de maíz azul debido a que estas últimas fueron más homogéneas en caracteres de espiga, longitud y diámetro de mazorca y dimensiones de grano. El maíz rojo posee más homogeneidad en sus caracteres. En ambos grupos de maíces, se encontraron tres grupos fenotípicos.

Literatura citada

- Aguilera-Ortíz, M., M.C. Reza-Vargas, R.G. Chew-Madinaveita y J.A. Meza-Velázquez. (2011). Propiedades funcionales de las antocianinas. *Biocencia*, 13(2),16-22. Disponible en: <http://biocencia.unison.mx/index.php/biocencia/article/view/81>
- Aguirre-Gómez, J.A., M.R. Bellon y M. Smale. (2000). A regional analysis of maize biological diversity in southeastern Guanajuato, Mexico. *Economic Botany*, 54(1), 60-72. DOI:<https://doi.org/10.1007/BF02866600>
- Alarcón-Aparicio, E., T. Alarcón-Zavaleta, P. Gómez-López, J. Alvarado, R. Oliart-Ros, E. Aquino, R. Guzmán-Gerónimo y J.L. Chávez-Servia. (2010). Total polyphenols, total anthocyanins and antioxidant activity of blue maize (*Zea mays* L.). En: Fourth International Congress on Food Science and Food Biotechnology in Developing Countries, November 29-December 1, Boca del Río, Veracruz, Mexico.
- Alarcón-Aparicio, E., R.I. Guzmán-Gerónimo, E.N. Aquino-Bolaños y J.L. Chávez-Servia. (2011). Actividad anticancerígena *in vitro* de extractos de maíz y tortilla azul. En: 3er. Congreso Internacional de Biología, Química y Agronomía, Septiembre 28–Octubre 1 de 2011, Zapopan, México. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.
- Aragón, F., S. Taba, J.M. Hernández, J.D. Figueroa, V. Serrano y F.H. Castro. (2006) Catálogo de Maíces de Oaxaca. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Libro Técnico No. 6. Oaxaca, México. 344 p.

- Arellano-Vázquez, J.L., C. Tut-Couoh., A. María-Ramírez, Y. Salinas-Moreno y O.R. Taboada-Gaytán. (2003). Maíz azul de los Valles Altos de México. I. Rendimientos de grano y caracteres agronómicos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26(2),101-107.
- Arellano-Vázquez, J. L., I. Rojas-Martínez y G.F. Gutiérrez-Hernández (2014). Variedades de maíz azul Chalqueño seleccionadas por múltiples caracteres y estabilidad de rendimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(8),1469-1480.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v5i8.828>
- Badstue, L.B., M.R. Bellon, J. Berthaud, X. Juárez, I. M. Rosas, A.M. Solano y A. Ramírez. (2006). Examining the Role of Collective Action in an Informal Seed System: A Case Study from the Central Valleys of Oaxaca, Mexico. *Human Ecology*, 34(2), 249-73.
<https://www.jstor.org/stable/27654117>
- Benz, B.F. (1986). Taxonomic and evolution of Mexican maize. Ph.D. Dissertation, University of Wisconsin. 433 p.
- Camacho-Villa, T.C. (2011). Making milpa, making life in La Selva: A testimony how Tzeltal peasants perform maize cultivation practices in the Lacandon jungle, Mexico. Ph.D. Thesis, Graduate School of Social Sciences, Wageningen University. 232 p.
- Carballoso-Torrecilla, V., A. Mejía-Contreras, S. Balderrama-Castro, A. Carballo-Carballo y F.V. González-Cossío. (2000). Divergencia en poblaciones de maíz nativas de valles altos de México. *Agrociencia*, 34(2), 167-174. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30234206>
- Castillo-Nonato, J. y C. Chávez-Mejía. (2013). Caracterización campesina del manejo y uso de la diversidad de maíces en San Felipe del Progreso, estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 10(1),23-38. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722013000100002&lng=es&nrm=iso. ISSN 1870-5472.
- Cázares-Sánchez, E., V.M. Interian K., J.L. Chávez S., E. Sauri D., M. González M., M.E. Guadarrama M. y L. Latorunerie M. (2005). Recetas de las Mujeres de Yaxcabá, Yucatán, cocinadas con ingredientes locales. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida, Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos, IDRC, Instituto Tecnológico de Mérida y Fundación PRODUCE-Yucatán. Mérida, México. 78 p.
- Chambers, K.J. y J. Henshall-Momsen. (2007). From the kitchen and the field: Gender and maize diversity I the Bajío region of Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 28(1), 39-56.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9493.2006.00275.x>
- Chávez-Servia, J.L y P. Diego-Flores. (2011). Familias campesinas y variación fenotípica de poblaciones nativas de maíz en la región de Tlaxiaco, Oaxaca. *Desarrollo, Ambiente y Cultura*, 1(1),28-38.
- Chávez-Servia, J.L., P. Diego-Flores y C.J. Carrillo-Rodríguez. (2011). Complejos raciales de poblaciones de

- maíz evaluadas en San Martín Huamelulpan, Oaxaca. *Ra Ximhai*, 7(1),107-115. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46116742010>
- Chávez-Servia, J.L., P. Diego-Flores y J.C. Carrillo-Rodríguez. (2012). Variación fenotípica de una muestra de maíces de la región Chalcatongo de Hidalgo, Oaxaca. *Ciencia Ergo Sum*, 19(3), 251-257. Disponible en: <https://cienciaergosum.uaemex.mx/articulo/view/7047>
- 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 de la Facultad de Ciencias Agraria*, 44(1),157-171. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382837650012>
- Espinosa-Trujillo, E., M.C. Mendoza-Castillo, F. Castillo-González, J. Ortiz-Cereceres, A. Delgado-Alvarado y A. Carrillo-Salazar. (2009). Acumulación de antocianinas en pericarpio y aleurona del grano y sus efectos genéticos en poblaciones criollas de maíz pigmentado. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(4), 303-309. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802009000400009&lng=es&nrm=iso. ISSN 0187-7380.
- Espinosa-Trujillo, E., M.C. Mendoza-Castillo, F. Castillo-González, J. Ortiz-Cereceres y A. Delgado-Alvarado. (2010). Altitud combinatoria del rendimiento de antocianinas y característica agronómicas en poblaciones nativas de maíz pigmentado. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(1),11-19. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802010000100004&lng=es&nrm=iso. ISSN 0187-7380.
- García, E. (1988). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 217 p.
- Guzmán-Gerónimo, R.I., T.M. Alarcón-Zavala, E. Silva-Hernández, J.E. Meza-Alvarado, S. Herrera-Meza, R.M. Oliart-Ros, J.L. Chávez-Servia. (2011). Polifenoles totales, antocianinas, actividad antioxidante de maíz azul y su efecto en ratas Wistar con síndrome metabólico inducido. In: 3er. Congreso Internacional de Biología, Química y Agronomía, Septiembre 28–Octubre 1 de 2011, Zapopan, México. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.
- Hayano-Kanashiro, C., C. Calderón-Vázquez, E. Ibarra-Laclette, L. Herrera-Estrella y J. Simpson. (2009). Analysis of gene expression and physiological responses in three Mexican maize landraces under drought stress and recovery irrigation. *PLoS ONE* 4:e7531 doi:10.1371/journal.pone.0007531.
- Hernández-Xolocotzi, E. (1985). Maize and man in the greater Southwest. *Economic Botany*, 39(4), 416-430. <https://doi.org/10.1007/BF02858749>
- Herrera-Cabrera, B.E., F. Castillo-González, J.J. Sánchez-González, R. Ortega-Paczka, M. Goodman. (2000). Caracteres morfológicos para valorar la diversidad entre poblaciones nativas de maíz en una región: caso de

- la raza Chalqueño. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 23(2), 335-354.
- Herrera-Cabrera, B.E., F. Castillo-González, J.J. Sánchez-González, J.M. Hernández-Casillas y R.A. Ortega-Paczka. (2004). Diversidad del maíz chalqueño. *Agrociencia*, 38(2),191-206. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30238207>
- Kato, T.A., C. Mapes, L.M. Mera, J.A. Serratos y R.A. Bye. (2009). Origen y Diversificación del Maíz: Una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México, D.F. 116 p.
- Lee, C-H., H.S. García y K.L. Parkin. (2010). Bioactivities of kernel extracts of 18 strains of maize (*Zea mays*). *Journal of Food Science*, 75(8),667-672. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01784.x>
- López-Martínez, L.X., R.M. Oliart-Ros, G. Valerio-Alfaro, C-H. Lee, K.L. Parkin y H.S. García. (2009). Antioxidant activity, phenolic compounds and anthocyanins content of eighteen strains of Mexican maize. *Food Science and Technology*, 4(6), 1187-1192. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.10.010>
- López-Martínez, L.X. y H.S. García-Galindo. (2009). Actividad antioxidante de extractos metanólicos y acuosos de distintas variedades de maíz mexicano. *Nova Scientia*, 2(3),51-65. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052010000100005&lng=es&nrm=iso>. ISSN 2007-0705.
- Louette, D., A. Charrier y J. Berthaud. (1997). *In situ* conservation of maize in Mexico: genetic diversity and maize seed management in a traditional community. *Economic Botany*, 51(1), 20-38. <https://doi.org/10.1007/BF029104>
- Mazza, G. (2007). Anthocyanins and health. *Annali dell'Istituto Superiore di Sanità*, 43(4),369-374.
- Mercer, K., A. Martínez-Vásquez y H.R. Perales. (2008). Asymmetrical local adaptation of maize landraces along an altitudinal gradient. *Evolutionary Applications*, 1, 489-500.<https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2008.00038.x>
- Miguel, M.A, J.L. Arellano, V., G. García, S. Miranda, J.A. Mejía, y F.V. González. (2004). Variedades criollas de maíz azul raza Chalqueño. Características agronómicas y calidad de semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27:9-15. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61027102>
- Mijangos-Cortés, J.O., T. Corona-Torres, D. Espinosa-Victoria, A. Muñoz-Orozco, J. Romero-Peñaloza y A. Santacruz-Varela. (2007). Differentiation among maize (*Zea mays* L.) landraces from the Tarasca Mountain Chain, Michoacán, Mexico and the Chalqueño complex. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 54(2),309-325. <https://doi.org/10.1007/s10722-005-4775-y>
- Perales R.H., S.B. Brush y C.O. Qualset. (2003a). Landraces of maize in Central Mexico: An altitudinal transect. *Economic Botany*, 57,7-20.

- [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2003\)057\[0007:LOMICM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2003)057[0007:LOMICM]2.0.CO;2)
- Perales, R.H., S.B. Brush y C.O. Qualset. (2003b). Dynamic management of maize landraces in Central Mexico. *Economic Botany*, 57,21-34. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2003\)057\[0021:DMOMLI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2003)057[0021:DMOMLI]2.0.CO;2)
- Pool, P.M.J. (2007). La demanda y oferta de semillas de maíz (*Zea mays* L.) y los factores que influyen en la diversidad de variedades entre los agricultores de Sacaba y Yaxcabá, Yucatán. Tesis M.C. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán. 144 p.
- Pressoir, G. y J. Berthaud. (2004a). Patterns of population structure in maize landraces from the central valleys of Oaxaca, México. *Heredity*, 92(2),88-94.
- Pressoir, G. y J. Berthaud. (2004b). Population structure and strong divergent selection shape phenotypic diversification in maize landraces. *Heredity*, 92(2),95-101.
- Rodríguez-Pérez, G., F. Zavala-García, C. Ojeda-Zacarías, A. Gutiérrez-Diez, J.E. Treviño-Ramírez y F. Rincón-Sánchez. (2012). Diversidad de maíces criollos de Nuevo León, México, mediante AFLP y caracteres morfológicos. *Agronomía Mesoamericana*, 23(1),29-39. Disponible en: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-13212012000100004&lng=en&nrm=iso. ISSN 2215-3608.
- Ruiz-Corral, J. A., N. Duran-Puga, J.J. Sánchez-González, J. Ron-Parra, D.R. González-Eguiarte, J.B. Holland y G. Medina-García. (2008). Climatic adaptation and ecological descriptors of 42 mexican maize races. *Crop Science*, 48(4),1502-1512.
- Sánchez-G, J.J., M.M. Goodman y C.W. Stuber. (2000). Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany*, 54(1),43-59. <https://doi.org/10.1007/BF02866599>
- Sánchez-G, J.J., M.M. Goodman y O. Rawlings. (1993). Appropriate characters for racial classification in maize. *Economic Botany*, 47(1),44-59. <https://doi.org/10.1007/BF02862205>
- Santa-Rosa., R.H., A. Gil-Muñoz, A. Santacruz-Varela, S. Miranda-Colín y L. Córdova-Téllez. (2008). Diversidad morfológica de maíces nativos del Valle de Puebla. *Agricultura Técnica en México*, 34(2), 189-200. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172008000200006&lng=es&nrm=iso. ISSN 0568-2517.
- Santa-Rosa, R.H., A. Gil-Muñoz, A. Santacruz-Varela, H. López-Sánchez, P.A. López y S. Miranda-Colín. (2012). Diversidad fenotípica de maíces nativos del altiplano centro-oriente del estado de Puebla, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(2),97-109.
- SAS. (1999). SAS® Procedures Guide, ver. 8. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 1643 p.
- Servicio de Información Agroalimentaria (SIAP). (2019) Anuario Estadístico de la Producción Agrícola 2018.

- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do (consultado: 15/11/2019).
- Soleri, D. y D.A. Cleveland. (2001). Farmers' genetic perception regarding their crop populations: an example with maize in the central valleys of Oaxaca, Mexico. *Economic Botany*, 55(1),106-128.<https://doi.org/10.1007/BF02864550>
- Stintzing, F.C. y R. Carle. (2004). Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food, and in human nutrition. *Trends in Food Science and Technology*, 15(1), 19-38.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.07.004>
- Tuxill, J.D. (2005) Agrarian change and crop diversity in mayan milpas of Yucatan, Mexico. Ph. D. Thesis, Faculty of Graduate School, Yale University. 375 p.
- Urias-Peraldi, M., J. A. Gutiérrez-Urbe, R.E. Preciado-Ortiz, A.S. Cruz-Morales, S.O. Serna-Saldivar y S. García-Lara. (2013). Nutraceutical profiles of improved blue maize (*Zea mays*) hybrids for tropical regions. *Field Crop Research*, 141,69-76.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.008>
- Zilic, S., A. Serpen, G. Akillioglu, V. Gökmen y J. Vancetovic. (2012). Phenolic compounds, carotenoides, anthocyanins and antioxidant capacity of colored maize (*Zea mays* L.) kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(5),1224-1231.
<https://doi.org/10.1021/jf204367>