

## VARIACIÓN FENOTÍPICA ENTRE POBLACIONES PRECOCES DE MAÍZ NATIVO DE OAXACA

### PHENOTYPIC VARIATION BETWEEN EARLY POPULATIONS OF NATIVE MAIZE FROM OAXACA

<sup>1</sup>Prisciliano Diego-Flores , <sup>1</sup>Erika Padilla-Cortés , <sup>1</sup>Laura Martínez-Martínez , <sup>2</sup>José Cruz Carrillo-Rodríguez , <sup>3</sup>José Luis Chávez-Servia 

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-Oaxaca, Hornos 1003, Col. Noche Buena, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México, C.P. 71230. <sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, Exhacienda de Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México, C.P.71230. <sup>3</sup>Autor de correspondencia: ([jchavez@ipn.mx](mailto:jchavez@ipn.mx)).

#### RESUMEN

La selección y preservación de variedades locales de maíz que hacen cada año los agricultores en sus parcelas, modifican la estructura genética poblacional en direcciones diversas como es la precocidad a floración, rápido llenado de grano y cosecha. El objetivo fue evaluar la variación de caracteres agromorfológicos en cuatro poblaciones nativas clasificadas dentro de las razas Bolita y Zapalote Chico, mediante siembra y cultivo en tres localidades de Oaxaca, México. Las poblaciones evaluadas están en un proceso de selección masal (segundo ciclo) y se establecieron bajo un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones, en terrenos de agricultores de Santa Lucia Miahuatlán, Coatecas Altas y Villa de Zaachila, Oaxaca, esta última bajo riego y las primeras en temporal. En los análisis de varianza se registraron diferencias significativas entre poblaciones y localidades para todas las variables, excepto en días a floración masculina entre localidades, y las interacciones localidades-poblaciones no presentaron diferencias significativas en ocho de catorce variables evaluadas. En Zaachila, se registraron valores fenotípicos de mayor magnitud, pero entre localidades de temporal la respuesta fue baja y semejante. En floración masculina, grosor de 10 granos y peso de 500 granos, se estimaron valores altos de varianza genotípica o poblacional y en heredabilidad en sentido amplio. El análisis de componentes principales fue útil para describir y discriminar la variación fenotípica diferencial entre

las poblaciones evaluadas, principalmente con una mayor contribución explicativa de altura de planta y mazorca, volumen y peso de 500 granos.

**Palabras clave:** Conservación *in situ*, heredabilidad, razas de maíz, sistema milpa, varianzas fenotípicas.

#### ABSTRACT

The selection and preservation of the maize local varieties which farmers done every year in their parcels, modify the genetic structure of the populations on many addresses such as precocity to flowering, fast grain filling and harvest. The agromorphological traits variation was evaluate in four native populations classified within from the Bolita and Zapalote Chico races, throughout the sow and cultivation in three locations of Oaxaca, Mexico. The evaluated populations were under a mass selection process (second cycle) and were evaluated under a randomized complete block design with four replicates, in parcels of farmers from Santa Santa Lucia Miahuatlan, Coatecas Alta and Villa de Zaachila, Oaxaca, last one with irrigation and two first in rainfall conditions. Significant differences were determined between populations and locations over all variables, except in days to male flowering between locations. The location-population interactions presented significant differences in eight from fourteen evaluated variables. At Zaachila locations, irrigated condition, the highest values were recorded. Hight values of genotypic or population variance and

broad sense heritability were recorded in days to male flowering, thickness of 10 grains and weight of 500 grains, and the principal component analysis was useful to describe and discriminate the evaluated total variability, where plant and cob height, volume and weight of 500 grain contributed significantly.

**Index words:** *In situ* conservation, heritability, races of maize, milpa system, phenotypic variances.

## INTRODUCCIÓN

El maíz sigue en evolución bajo domesticación, en manos de pequeños agricultores. Esto favorece una mayor diversidad genética y fenotípica de la especie en México que se preserva *in situ*, en parcelas y traspatios de comunidades de agricultores. En diferentes reportes se ha evidenciado que los agricultores hacen selección tradicional de sus semillas usando sus propios criterios y de manera continua, ciclo tras ciclo (Magdaleno-Hernández et al., 2016), y esos eventos de selección tienden a modificar las estructuras genéticas y fenotípicas de su poblaciones cultivadas, a tal punto que generan diferenciaciones genéticas entre y dentro de poblaciones aun cuando se cultiven dentro de la misma comunidad o parcelas continuas (Pressoir y Berthaud, 2004), y a veces las distinguen usando nombres locales como violentos, precoces, rápidos, por color de grano, forma de grano, tamaño de mazorca, altura de planta, zona de cultivo o del nicho agroecológico donde la siembran (ejemplo: tierra caliente, zona baja, zona alta, serrano, etc.) (Castillo-Nonato y Chávez-Mejía, 2013).

Desde la introducción del concepto de raza de maíz por Anderson y Cluter (1942), formalización en México por Wellhausen, Roberts y Hernández (1952) y posteriores análisis genéticos y fenotípicos, siempre se asoció una relación biocultural directa entre la conservación *in situ* de las razas nativas con los grupos originarios o étnicos, porque parte de la evolución de las razas actuales tiene una fuerte influencia de la selección humana y un efecto ambiental de adaptación a

nichos y/o micronichos agroecológicos regionales (Perales y Golicher, 2014). En este sentido, las razas Bolita y Zapalote Chico son emblemas bioculturales de la gastronomía y cultura alimentaria de Oaxaca; por ejemplo, Bolita se distingue para la elaboración de tlayudas y téjate en los Valles Centrales, y Zapalote para los tradicionales totopos del Istmo de Tehuantepec, y ambas tienen una distribución ecogeográfica restringida, principalmente en las regiones donde se utiliza, aunque se han reportado en otras regiones de Oaxaca y de México. En ambos casos se han identificado variantes poblacionales con porte bajo, precoces a la floración y de mazorcas medianas (Ramírez-Jaspeado et al., 2013; Cabrera-Toledo et al., 2019).

Los maíces nativos pigmentados de México son foco de atención en la industria alimentaria por su aportación de compuestos bioactivos y efecto preventivo de diferentes enfermedades asociadas con la alimentación. Salinas-Moreno et al. (2012) identificaron hasta 15 tipos de antocianinas y antocianindinas en granos rojo-azules de maíces de las razas Bolita, Chalqueño y Elotes Cónicos; y Herrera-Sotero et al. (2020) evaluaron el efecto antiproliferativo de antocianinas extraídas de tortilla de maíces de la raza Chalqueño de la Mixteca, sobre líneas celulares mutagénicas, y determinaron un efecto preventivo de proliferación de células cancerígenas de próstata y mama. No obstante, estas poblaciones con uso potencial en salud pueden alterar sus mecanismos adaptativos, producción de compuestos bioactivos y de respuesta ante los efectos del cambio climático. Ureta et al. (2020) señalan que los maíces nativos mexicanos más vulnerables ante el cambio climático son aquellos que se siembra en condiciones de temporal e indica que las estaciones restrictivas en precipitación y/o con incrementos de temperatura ocasionan fuertes decrementos en rendimientos y una posible pérdida de poblaciones nativas. Esto implicaría que los agricultores tendrían frecuentes pérdidas de cosechas por años de bajas precipitaciones o sequías intraestivales prologadas, lo que agudiza el estrés con incrementos de temperaturas.

La sequía, escasez o irregularidad de lluvias, generan pérdidas parciales o totales de la cosecha de maíz, y tienen efectos socioeconómicos mayores cuando ocurren en terrenos de familias tradicionales con escasos recursos económicos y de subsistencia. Este es un fenómeno recurrente anual en Oaxaca y se evidencia en diferentes regiones del país o del mundo como parte de los efectos de cambios climáticos (Ureta et al., 2020; Woodmansee, 2022). Una estrategia de respuesta desde el mejoramiento genético es, recurrir a los acervos genéticos de los bancos de germoplasma para generar variedades mejoradas o recurrir a la evaluación de poblaciones nativas preservadas *in situ* en manos de los agricultores e iniciar una selección recurrente. Así, desde hace décadas se busca seleccionar genotipos tolerantes o con ciertos mecanismos de resistencia o escape a la sequía, aunque en campo es difícil separar individuos o plantas resistentes. Por tanto, la estrategia más recurrente es la selección por precocidad a la floración, sincronía floral y rápido llenado de grano como un medio de escape a la sequía o buscar mayor eficiencia de aprovechamiento de la escasa lluvia estacional y errática (Mercer y Perales, 2019; Nelimor et al., 2019; Nelimor et al., 2020). En este contexto, se evaluó la variación agromorfológica de cuatro poblaciones nativas agrupadas dentro de las razas Bolita y Zapalote Chico, mediante la siembra y cultivo en tres localidades de Oaxaca, México, en terrenos de agricultores tradicionales que practican el sistema milpa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Poblaciones nativas y localidades de evaluación

Con base en recorridos comunitarios y de colecta, se integró una colección de cuatro poblaciones previamente reconocidas como precoces; dos (Zapalote Chico 1 y 2) fueron colectada en comunidades de Santo Domingo Tehuantepec en altitudes de 61 y 82 m, y se complementaron con

dos poblaciones de los Valles Centrales de Oaxaca, una de Cuilapam de Guerrero (Bolita 1) y otra de Coatecas Altas (Bolita 2) con altitudes de 1546 y 1560 m, respectivamente. Estas poblaciones estaban en un segundo ciclo de selección masa visual al momento del experimento. La siembra experimental se realizó en terrenos de agricultores tradicionales de tres localidades distantes de 40 a 100 km: La Cofradía municipio de Santa Lucia Miahuatlán (julio 12, 2018), cabecera municipal de Coatecas Altas (junio 25, 2018) y terrenos del municipio de Villa de Zaachila (febrero 5, 2019). En Santa Lucia Miahuatlán y Coatecas Alta la siembra y cultivo fueron en condiciones de temporal y Zaachila en condiciones de riego (Tabla I).

### Diseño y manejo experimental

Los ensayos en cada localidad se establecieron bajo un diseño experimental de bloque al azar y cuatro repeticiones, con una parcela experimental de cinco surcos de 10 m de largo y 0.8 m entre surcos. La fórmula de fertilización utilizada fue de 120-80-60 de N, P y K, respectivamente, con división del nitrógeno de 60 kg a la primera escarda y 60 kg a la floración masculina. El control de malezas y plagas se hizo de forma tradicional con yunta, manual y herbicida comerciales. La caracterización y evaluación de las poblaciones se realizó con referencia en las variables descritas y criterios de trabajos previos (Chávez-Servia et al., 2011, 2012; Torres-Escamilla et al., 2019). En diez plantas por parcela se midió la altura de planta y mazorca, también en diez mazorcas se registró la longitud y diámetro de mazorca, diámetro de olote, número de hileras y número de granos por hilera; los días después de la siembra a floración masculina y femenina se registraron por parcela experimental; el ancho, longitud y grosor se evaluó en hileras de 10 granos; se estimó el volumen y peso de 500 granos; y complementariamente se evaluó el peso de grano y olote de 10 mazorcas.

**Tabla I.** Características eco-geográficas, edáficas y climáticas de las localidades de evaluación en Coatecas Altas, Santa Lucia Miahuatlán y Villa de Zaachila, Oaxaca.

Descriptor de localidad	Coatecas Altas (2018)	La Cofradía, Santa Lucía Miahuatlán (2018)	Villa de Zaachila (2019)
Longitud oeste (LO)	96° 40'20.7"	96° 37' 6.5"	96° 44' 58"
Latitud norte (LN)	16° 31'40.2"	16° 07' 25.7"	16° 57' 04"
Altitud (m)	1524	853	1560
Temperatura máxima (°C)	22	24	20.7
Temperatura mínima (°C)	16	18	11.1
Temperatura media (°C)	19	20	18.9
Precipitación media anual (mm)	500	800-1324	675
Humedad relativa (%)	65	75	68
Suelos frecuentes (clasificación FAO/UNESCO)	Regosol, Cambisol y Phaeozem.	Regosol, Luvisol y Leptosol	Luvisol y vertisol
Clima	Semiseco semicálido con lluvias en verano	Semiseco semicálido a semicálido subhúmedo con lluvias en verano	Semicálido húmedo con lluvias en verano

### Análisis estadístico

Con la información de las variables evaluadas se integró una base de datos y se realizaron análisis de varianzas combinados mediante el modelo lineal de bloques al azar con el propósito de determinar las diferencias entre poblaciones, localidades de evaluación e interacción poblaciones-localidades, donde el efecto de repeticiones se consideró anidado en localidades. Cuando hubo diferencias entre factores principales o interacción, se hicieron comparaciones múltiples de medias por el método de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). Complementariamente, se estimaron los componentes de varianza por el método de máxima verosimilitud restringida (REML) mediante el procedimiento VARCOMP del paquete estadístico SAS (2006) y a partir de esos valores de varianzas ( $\sigma^2$ ), se calculó la heredabilidad en sentido amplio ( $H^2$ ) mediante la expresión  $H^2 = \sigma^2_{\text{Poblaciones}} / (\sigma^2_{\text{Localidades}} + \sigma^2_{\text{Poblaciones}} + \sigma^2_{\text{Localidades-Poblaciones}} + \sigma^2_{\text{error}})$ , donde los subíndices indican los efectos, y se acotó sólo en aquellas variables con interacciones localidades-poblaciones significativas. Posteriormente, con los promedios de la interacción localidades-poblaciones se realizó un análisis descriptivo de componentes principales a partir de datos estandarizados y mediante la matriz de varianzas-

covarianzas con el propósito de identificar las diferencias genotípicas o poblacionales a través de localidades y variables de mayor valor descriptivo. Todos los análisis se hicieron con el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS, 2006).

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Entre comunidades de agricultores tradicionales oaxaqueños la adopción de variedades mejoradas no supera el 10 % y cuando esto ocurre se realiza entre agricultores de agricultura intensiva, de riego o buen temporal y porque la venta del maíz es su objetivo, pero no entre agricultores de subsistencia (Luna-Mena et al., 2016). Un contexto incluido en evaluación dos localidades en condiciones de temporal y una condición de riego, las que ofrecen respuestas diferentes dentro de la siembras tradicionales y objeto de estudio. Esto ha permitido que, las dinámicas de las poblaciones de maíz continúen su evolución en terrenos de agricultores y se preserve una alta diversidad como muestran López-Romero et al. (2010) y González-Castro et al. (2013) en poblaciones de Zapalote Chico del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca donde se preserva una alta variabilidad genética. En este trabajo, el análisis de varianza combinado mostró diferencias significativas entre localidades

**Tabla 2.** Significancia de cuadrados medios de los análisis de varianza de caracteres agromorfológicos en poblaciones de maíces precoces razas Bolita y Zapalote Chico de Oaxaca.

Fuentes de variación	Localidades (L)	Poblaciones (Po)	L x Po	Rep./ L	Error	C.V. (%)
Altura de planta	301903**	41840**	1525**	2542**	395	16.0
Altura de mazorca	125259**	9150**	891**	1123**	265	22.4
Longitud de mazorca	594.5**	181.8**	4.1 <sup>ns</sup>	11.5**	2.3	15.7
Diámetro de mazorca	55.96**	6.54**	0.10 <sup>ns</sup>	0.99**	0.15	10.1
Diámetro de olote	13.94**	4.70**	0.22*	0.33**	0.08	13.7
Número de hileras	31.01**	45.31**	2.35 <sup>ns</sup>	1.96 <sup>ns</sup>	2.08	13.8
Número de granos por hilera	2861.6**	283.7**	6.8 <sup>ns</sup>	110.1**	16.7	19.6
Días a floración masculina <sup>1</sup>	0.19 <sup>ns</sup>	46.78**	18.30**	7.96*	2.81	2.6
Días a floración femenina	234.1**	24.3*	1.8 <sup>ns</sup>	7.1 <sup>ns</sup>	5.55	3.2
Ancho de 10 granos	4.26**	12.12**	0.12 <sup>ns</sup>	0.43 <sup>ns</sup>	0.31	5.8
Longitud de 10 granos	13.37**	18.13**	0.84 <sup>ns</sup>	1.58 <sup>ns</sup>	0.87	8.3
Grosor de 10 granos	1.47**	4.07**	0.11*	0.04 <sup>ns</sup>	0.04	5.6
Pesos de 500 granos	12114.8**	30799.2**	800.3**	313.4**	346.6	13.4
Volumen de 500 granos	20742.9**	62435.7**	903.0 <sup>ns</sup>	1472.6 <sup>ns</sup>	1403.2	18.9
Peso de grano/10 mazorcas	963604**	195471**	13308 <sup>ns</sup>	15720 <sup>ns</sup>	8401	15.0
Peso de olote/10 mazorcas	73.9**	38.3**	1.1 <sup>ns</sup>	1.0 <sup>ns</sup>	1.08	10.9

<sup>ns</sup> No significativo ( $p > 0.05$ ); \* significativo a  $p \leq 0.05$ ; \*\* significativo a  $p \leq 0.01$ ; C.V. = coeficiente de variación; <sup>1</sup>días después de la siembra.

de evaluación y poblaciones para todas las variables evaluadas, con excepción de días a floración femenina donde no hubo diferencias significativas entre localidades. En la interacción localidades-poblaciones (L × Po) se registraron diferencias significativas en altura de planta y mazorca, diámetro de olote, días a floración masculina, grosor de 10 granos, peso de 500 granos, peso de grano y olote de 10 mazorcas. También se registró que la varianza debida al efecto de localidades y/o poblaciones fue significativamente superior al efecto de la interacción L × Po, e indica que la magnitud de los efectos principales es mayor e independientes de la interacción (Tabla 2).

Entre localidades de evaluación se presentaron diferencias significativas con alta variabilidad y patrones diferenciales entre siembras de temporal y la localidad de riego, en todas las variables evaluadas. Esto es, la localidad Villa de Zaachila (riego) presentó promedios de variables que difieren significativamente del promedio registrado en Coatecas Altas y Santa Lucía Miahuatlán, incluyendo precocidad a floración femenina, 69.9 días después de la siembra (*ddt*) y hubo sincronía floral con la floración masculina

(64.6 *ddt*). La ausencia de diferencias significativas en días a floración femenina, entre localidades, señalan coincidencias para posibles programas de cruzamiento, pero también muestra que el riego no favorece una mayor precocidad porque también coincidió con altas temperaturas en la localidad de riego semejante a las localidades seca (Coatecas) y húmeda (Miahuatlán). Por otro lado, no se registraron diferencias significativas en la respuesta promedio de las poblaciones al cultivarse en Coatecas Altas y Santa Lucía Miahuatlán, ambas bajo un sistema tradicional de cultivo en temporal, excepto en peso de grano y olote de 10 mazorcas donde el patrón fue Zaachila > Coatecas > Miahuatlán. Es de señalar que no indica pérdida de cosecha en los ambientes de temporal sino un menor rendimiento de grano o productividad. En los diferentes patrones se muestra que, las condiciones de temporal de Coatecas y Miahuatlán favorecieron valores bajos en todas las variables evaluadas en comparación con la condición de riego (Zaachila), y en este caso se expresó una mayor valor fenotípico o valores altos de respuesta en las variables evaluadas, y esas diferencias fueron evidentes en altura de planta y

**Tabla 3.** Efecto de localidades de evaluación y comportamiento medio de poblaciones nativas de maíz en tres ambientes de cultivo de Oaxaca.

Variables evaluadas	Localidades de cultivo, Oaxaca			Poblaciones nativas evaluadas			
	Coatecas Alta-2018	Míahuatlán -2018	Zaachila-2019	Bolita I	Bolita 2	Zapalote Chico I	Zapalote Chico 2
Altura de planta (cm)	98.8 b <sup>1</sup>	98.8 b	174.0 a	141.3 a <sup>1</sup>	137.9 a	113.2 b	103.1 c
Altura de mazorca (cm)	56.5 b	56.5 b	104.9 a	75.1 b	82.3 a	71.7 b	61.3 c
Longitud de mazorca (cm)	8.5 b	8.5 b	11.8 a	11.1 a	10.1 b	8.8 c	8.4 c
Diámetro de mazorca (cm)	3.4 b	3.4 b	4.4 a	4.1 a	3.8 b	3.6 c	3.5 c
Diámetro de olote (cm)	1.9 b	1.9 b	2.4 a	2.34 a	2.01 b	1.90 c	1.97 bc
Número de hileras	10.2 b	10.2 b	11.0 a	10.0 c	9.9 c	11.2 a	10.7 b
Número de granos por hilera en mazorca	18.3 b	18.3 b	25.7 a	19.2 c	20.6 b	22.9 a	20.5 bc
Días a floración masculina	64.4 a	64.4 a	64.6 a	64.6 b	64.4 b	66.9 a	62.1 c
Días a floración femenina	76.5 a	76.5 a	69.9 b	74.5 ab	76.2 a	73.7 ab	72.8 b
Ancho de 10 granos (cm)	9.3 b	9.3 b	10.2 a	10.7 a	10.1 b	8.6 c	8.8 c
Long. de 10 granos (cm)	10.7 b	10.7 b	12.3 a	11.9 a	12.6 a	10.7 b	9.8 b
Grosor de 10 granos (cm)	3.6 b	3.6 b	4.1 a	4.4 a	3.9 b	3.1 c	3.4 c
Volumen de 500 granos (mL)	175.3 b	175.3 b	242.3 a	286.1 a	225.6 b	137.5 c	137.7 c
Pesos de 500 granos (g)	120.6 b	120.6 b	171.9 a	196.0 a	164.8 b	93.4 c	94.6 c
Peso de grano/10 mazorcas (g)	386.9 c	574.3 b	873.4 a	751.0 a	687.9 a	515.7 b	491.5 b
Peso de olote/10 mazorcas (g)	60.3 c	85.9 b	145.0 a	141.7 a	111.3 b	65.5 c	69.7 c

<sup>1</sup>En renglón, entre localidades y entre poblaciones, medias con la misma letra no difieren significativamente (prueba de Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

mazorca, precocidad a floración femenina, peso y volumen de 500 granos, entre otros (Tabla 3). En términos de manejo agronómico se registró de manera constante que el riego mejora la productividad como parte de la respuesta a una disponibilidad constante de humedad y aprovechamiento de las fertilizaciones y mejores condiciones de cultivo en las poblaciones nativas.

Madeiras-Barbosa et al. (2021) proponen el uso de germoplasma tropical y subtropical de maíz nativo para contrarrestar el efecto de la intensidad y frecuencia de la sequía, como parte de las consecuencias del cambio climático. En este sentido, las poblaciones evaluadas nativas fueron significativamente diferentes y altamente variables, donde el patrón recurrente, a través de los caracteres evaluados, fue una diferenciación a favor de las poblaciones agrupadas en la raza Bolita con mayores valores fenotípico en relación con las poblaciones de Zapalote Chico. Por ejemplo, en altura de planta y mazorca, características de mazorca y grano de Bolita I y 2, fueron significativamente mayores que los valores

registrados en las poblaciones de Zapalote I y 2 (Tabla 3). La referencia de todas las poblaciones es la precocidad a la floración masculina y femenina, promedios de 64.4 a 76.2 ddt en Bolita y de 62.1 a 73.7 ddt en Zapalote, estas floraciones difieren de las registradas (95 a 113 ddt) por Chávez-Servia et al. (2011) entre complejos raciales de zonas altas en San Martín Huamelúlpam, Oaxaca; respetando las diferencias altitudinales de 853-1560 y 2200 m de evaluación y germoplasma evaluado, respectivamente.

Los resultados descritos en las poblaciones evaluadas, se encuentran dentro de los valores registrados por Cabrera-Toledo et al. (2019) en una colección de 18 poblaciones de Zapalote, cultivadas en el Istmo (San Pedro Comitancillo, Oaxaca), de 45.6 a 51.1 días a floración masculina y/o femenina, y la misma tendencia se registró en altura de planta y mazorca con variaciones de 184.2 a 214.2 cm y de 64.2 a 95.5 cm, respectivamente; esto comparado con la variación de 103.1 a 113.2 cm en altura de planta y de 61.3 a 71.7 cm en altura de mazorca, en este trabajo. En

peso de grano de 10 mazorcas el patrón fue Bolita 1 = Bolita 2 > Zapalote 1 = Zapalote 2 y en peso de olote de 10 mazorcas fue Bolita 1 > Bolita 2 > Zapalote 1 = Zapalote 2 e indica alta variabilidad productividad de grano en mazorcas cuya relación grano:olote es 5.3-7.9:1; es decir, una alta conversión en grano (Tabla 3). Es de resaltar que, las poblaciones de Zapalote están fuera de su ambiente de origen y cultivo, pero no es el caso de las poblaciones de Bolita que muestran mayor adaptación y valores promedio de respuesta en Zaachila, Coatecas Altas y Miahuatlán por estar cercanas a sus orígenes y ambientes usuales de cultivo. Además, no se descarta que parte de la selección masal practicada a estas poblaciones ya tienen un efecto incipiente.

En ancho, longitud y grosor de 10 granos se registraron diferencias marcadas en las poblaciones de la raza Bolita respecto a las de Zapalote Chico y denotan fuertemente el efecto racial descrito previamente por Wellhausen et al. (1952) Aragón et al. (2006). En esta evaluación, las poblaciones de Bolita presentaron significativamente mayor ancho, longitud y grosor de grano, o bien un grano más grande que las poblaciones de Zapalote (grano pequeño), características asociadas a menor tamaño de mazorca. Los resultados muestran un alto efecto racial y con menor efecto las diferencias entre poblaciones dentro de cada raza.

Arellano-Vázquez et al. (2003) evaluaron dos poblaciones de la raza bolita en cinco localidades de Puebla, Estado de México y Tlaxcala, y determinaron en promedio 104 días a floración femenina con 141 cm en altura de planta. Estos resultados difieren en floración femenina de los registros del presente trabajo (74.5 a 76.2 días), pero semejantes en altura de planta (137.9 a 141.3 cm). En este sentido, las poblaciones de maíz descritas por Sierra-Macías et al. (2014), clasificadas como raza Bolita de Veracruz, registraron características de mazorca (13.7 y 4.4 cm de largo y ancho) semejantes a los promedios estimados en estos experimentos reportados (Tabla 3). Como consecuencia de esta similitudes y diferencias; es de pensar que, los ambientes de

evaluación modifican características morfológicas de planta como altura, pero se pueden mantener como precoces y semejantes características de mazorca y grano.

Por otro lado, Cabrera-Toledo et al. (2019) determinaron variaciones de 9.4 a 13.3 y 3.7 a 4.4 cm en largo y diámetro de mazorca con promedios de 9.9 a 16.4 hilera y de 23.0 a 28.5 granos por hilera, en 18 poblaciones nativas de maíz de la raza Zapalote Chico, promedios superiores al registro del presente trabajo, en largo y diámetro de mazorca (8.4 a 8.8 y 3.5 a 3.6 cm) y granos por hilera (20.5 a 22.9), pero semejantes en número de hileras (11.7 a 11.2). No obstante, las diferencias se encuentran dentro de los parámetros de las características descritas de la raza Zapalote Chico, enunciadas por Wellhausen et al. (1952) y Aragón et al. (2006). Las poblaciones agrupadas dentro de Zapalote Chico y Bolita se diferenciaron significativamente en peso y volumen de 500 granos, peso de grano y olote de 10 mazorcas con valores mayores o cerca del doble en Bolita. En forma general se muestra que, en caracteres asociados con rendimiento de grano Bolita 1 y 2 presentaron los mayores valores fenotípicos, pero Zapalote Chico 2 la mayor precocidad y porte bajo (Tabla 3), este último puede ser útil como una estrategia de escape a la sequía que es común en los Valles Centrales de Oaxaca.

En la interacción localidades-poblaciones nativas no se registraron diferencias significativas en longitud y diámetro de mazorca, número de hileras por mazorca, granos por hilera, días a floración femenina, largo y ancho de grano, volumen de 500 granos, peso de grano y olote de 10 mazorcas. En este caso, los rangos de variación en las variables registradas fueron: 7.4 a 13.9 cm en longitud y 3.2 a 4.8 cm de diámetro de mazorca, 9.5 a 11.7 hileras en la mazorca, 16.4 a 27.5 granos por hileras, días a floración femenina de 68.5 a 78.0, ancho promedio de 10 granos 8.4 a 11.4 cm, longitud promedio de 10 granos 9.0 a 12.8 cm, y volumen de 500 granos de 110.0 a 326.0 mL. En peso de grano y olote de 10 mazorcas se registraron variaciones de 274.3 a

1057.5 g y de 42.5 a 214.5 g, respectivamente. Parte de la ausencia de diferencias significativas, es indicador de una alta variabilidad dentro de cada población evaluada y es constante a través de localidades de evaluación. Este efecto puede estar relacionado con el proceso de selección masal en que se encuentran las poblaciones, aun cuando no pueden considerarse uniformes.

En altura de planta y mazorca, diámetro de olote, días a floración masculina, grosor de 10 granos y peso de 500 granos, se registraron diferencias significativas en la interacción localidades-poblaciones y se observó un patrón diferencial entre poblaciones evaluadas de localidad a localidad. Por ejemplo, en altura de planta, diámetro de olote, grosor de 10 granos y peso de 500 granos Zapalote Chico 1 y 2 presentaron los valores más bajos en las tres localidades de evaluación y el comportamiento opuesto fue para Bolita 1 y 2. En días a floración masculina, Zapalote Chico 1 se registró como tardío y similar a Bolita 1 a través de localidades. En consecuencia, los materiales sobresalientes en densidad y grosor de grano fueron Bolita 1 y con mejor comportamiento en Zaachila, Zapalote Chico 2 precoz y con menor altura de plantas y mazorca (Tabla 4). Esto indica que, entre poblaciones evaluadas la mayor productividad está en Bolita, y en Zapalote Chico mayor precocidad. Entre las observaciones de campo, se registró mayor frecuencia de plantas con dos mazorcas en las poblaciones de Zapalote Chico e indica que es un material con respuesta agronómica favorable en los Valles Centrales de Oaxaca, aun cuando es originario del Istmo.

En el análisis de componentes de varianza se estimó que la varianza ambiental o de localidades de evaluación ( $\sigma^2_{\text{Localidades}}$ ) fue mayor que la genotípica o de poblaciones ( $\sigma^2_{\text{Poblaciones}}$ ) y de interacción localidades-poblaciones ( $\sigma^2_{L \times P_0}$ ) en altura de planta y mazorca y diámetro de olote. En contraste, en días a floración masculina, grosor de 10 grano y peso de 500 granos, la  $\sigma^2_{\text{Poblaciones}}$  fue mayor que la  $\sigma^2_{\text{Localidades}}$  y  $\sigma^2_{L \times P_0}$ . Estos patrones de mayor efecto ambiental y genotípico se reflejan

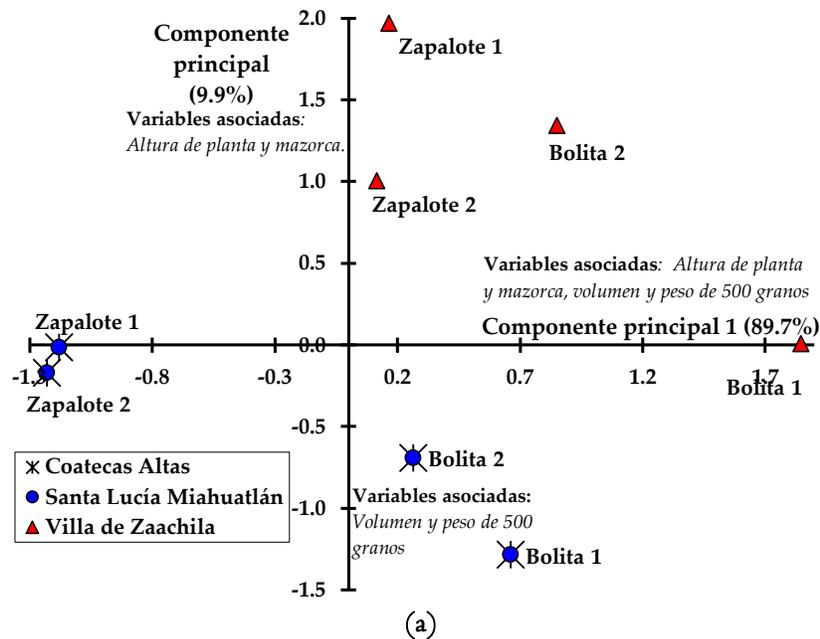
directamente en los valores de heredabilidad en sentido amplio ( $H^2$ ); en el primer patrón los valores de  $H^2$  varían de 0.06 a 0.18 ( $H^2$ , baja) e indican un mayor efecto ambiental, pero en el segundo fue de 0.30 a 0.69 ( $H^2$ , media a alta) que hacen referencia al efecto genotípico y comportamiento constante de localidad a localidad o mayor transferencia o repetibilidad de progenitores a progenie en las poblaciones aquí evaluadas, principalmente en grosor de 10 granos y peso de 500 granos (Tabla 4). En peso de grano y de olote de 10 mazorcas, se registraron heredabilidades ( $H^2$ ) de 0.18 (baja) y 0.33 (media), respectivamente. Estos efectos de mayores valores en  $\sigma^2_{\text{Poblaciones}}$  también fueron registradas por López-Romero et al. (2005) en días a floración femenina, grosor de grano y peso de 100 granos entre poblaciones de Zapalote del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. Los resultados muestran indicios de que los maíces tipo Zapalote Chico del Istmo o Bolita de Valles Centrales son candidatos a un proceso de selección masal o selección familiar, esto último a partir de la selección de individuos deseables (por ejemplo, selección familiar mazorca por surco) por alta heredabilidad en peso de grano.

En el análisis descriptivo de componentes principales (CP) se determinó que al segundo componente se acumuló un 99.6.% de la varianza fenotípica total donde los dos primeros componentes incluyeron a altura de planta y mazorca, volumen y peso de 500 granos, y número de granos por hilera como las variables de mayor valor explicativo. En la Figura 1 se representa la dispersión gráfica de las interacciones poblaciones-localidades, donde se observa una diferenciación de comportamiento de los dos grupos de poblaciones (Zapalote Chico y Bolita) en función del sitio de evaluación. Por ejemplo, las poblaciones de Bolita y Zapalote Chico presentaron su mayor expresión fenotípica en la localidad de Zaachila, pero en Miahuatlán o Coatecas Altas fue menor la respuesta, aun cuando se notan diferencias poblacionales de comportamiento. En la misma Figura 1 también se graficó las diferencias entre poblaciones respecto

**Tabla 4.** Interacciones significativas localidad-poblaciones nativas de maíz, heredabilidad y varianzas poblacional (genotípica), ambiental e interacción localidad-población, en respuesta a la evaluación en tres localidades de Oaxaca.

Localidades y poblaciones	Altura de planta (cm)	Altura de mazorca (cm)	Diámetro de olote (cm)	Días a floración masculina	Grosor de 10 granos (cm)	Peso de 500 granos (g)
Coatecas Altas (P.V. 2018):						
Bolita 1	117.6 d <sup>1</sup>	61.4 cd	2.1 c	64.7 a-c	4.2 b	172.5 b
Bolita 2	115.5 d	66.8 c	1.8 d	63.2 bc	3.9 bc	161.2 b
Zapalote 1	82.9 e	51.6 de	1.8 d	68.5 a	2.9 e	74.7 c
Zapalote 2	79.2 e	46.0 e	1.8 d	61.2 c	3.1 de	73.7 c
La Cofradía, Santa Lucía Miahuatlán (P.V. 2018):						
Bolita 1	117.6 d	61.4 cd	2.1 c	64.7 a-c	4.2 b	172.5 b
Bolita 2	115.5 d	66.8 c	1.8 d	63.2 bc	3.9 bc	161.2 b
Zapalote 1	82.9 e	51.6 de	1.8 d	68.5 a	2.9 e	74.7 c
Zapalote 2	79.2 e	46.0 e	1.8 d	61.2 c	3.1 de	73.7 c
Villa de Zaachila (P.V. 2019):						
Bolita 1	188.6 a	102.4 ab	2.8 a	64.2 bc	4.9 a	233.5 a
Bolita 2	182.7 ab	113.5 a	2.4 b	66.7 ab	4.0 bc	171.9 b
Zapalote 1	173.9 b	111.7 a	2.1 c	63.7 bc	3.6 cd	130.6 b
Zapalote 2	150.9 c	92.1 b	2.3 bc	63.7 bc	3.8 bc	136.2 b
<b>Componentes de varianza (método REML) y heredabilidad en sentido amplio:</b>						
$\sigma^2$ -Localidades (L)	1877.4	777.3	0.086	0.00	0.09	708.8
$\sigma^2$ -Poblaciones (Po)	336.0	68.8	0.037	2.75	0.33	2474.7
$\sigma^2$ -L x Po	27.2	15.2	0.003	2.42	0.02	121.4
$\sigma^2$ -error	436.6	281.5	0.085	4.10	0.04	338.3
Heredabilidad en sentido amplio ( $H^2$ ) <sup>2</sup>	0.13	0.06	0.18	0.30	0.69	0.68

<sup>1</sup> En columna, entre interacciones localidad-población, medias con la misma letra no difieren significativamente (Tukey,  $p \leq 0.05$ );  $H^2 = \sigma^2$ -Poblaciones (Po) / [ $\sigma^2$ -Localidades (L) +  $\sigma^2$ -Poblaciones (Po) +  $\sigma^2$ -L x Po +  $\sigma^2$ -error].



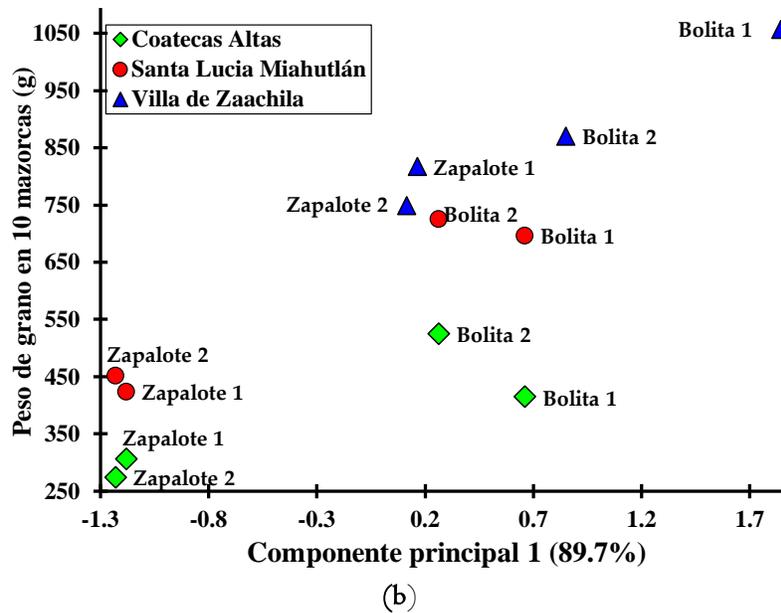


Figura I. Dispersión de interacción poblaciones-localidades de evaluación en función de los dos primeros componentes principales (a) y su discriminación con base en el primer componente principal y peso de grano de 10 mazorcas (b).

al peso de grano en 10 mazorcas y primer componente principal (a manera de índice), y se observó que Bolita y Zapalote Chico difieren fenotípicamente y presentan diferencias relevantes en peso de grano a través de localidades de evaluación. Esto es, tanto fenotípicamente como agronómicamente se diferencian las poblaciones de ambas razas evaluadas.

## CONCLUSIONES

La evaluación de cuatro poblaciones de maíz precoz en tres localidades o ambientes de cultivo mostró que, las poblaciones presentaron alta variabilidad y diferencias significativas en caracteres agromorfológicos, con mayores valores fenotípicos en las poblaciones agrupadas dentro de la raza Bolita. Las condiciones agroecológicas de las localidades de cultivo influyeron significativamente en la respuesta de las poblaciones, donde la condición de riego favoreció una mayor expresión de caracteres relacionados con rendimiento (por ejemplo: características de grano, volumen y peso de 500 granos) que en las dos localidades de temporal. La población Bolita I de Cuilapam de Guerrero se mostró como promisorio para posteriores evaluaciones o iniciar

un programa de mejoramiento, presentó significativamente los mayores valores de caracteres de mazorca, grano, peso y volumen de grano. La varianza genotípica o poblacional y los valores de heredabilidad en sentido amplio ( $H^2$ ) fueron mayores que el efecto ambiental o de localidad en días a floración, grosor de 10 granos y peso de 500 granos ( $0.30 \leq H^2 \leq 0.69$ ). La mayor precocidad de las poblaciones de Zapalote Chico (menos de 74 días a floración femenina) muestran indicios que pueden utilizarse como una estrategia de escape a sequía en las siembras de los Valles Centrales de Oaxaca.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de los agricultores de Villa de Zaachila, Coatecas Altas y Santa Lucía Miahuatlán quienes nos permitieron hacer uso de sus terrenos para el establecimiento de los experimentos de campo. Esta investigación fue financiada por el Instituto Politécnico Nacional a través del proyecto SIP-20230580.

## REFERENCIAS

- Aragón, F., Taba, S., Hernández, J.M., Figueroa, J.D., Serrano, V. y Castro, F.H. (2006). *Catálogo de Maíces Criollos de Oaxaca*. INIFAP-SAGARPA. Libro Técnico No. 6. Oaxaca, México. 344 p.
- Anderson, E. and Cutler, H.C. (1942). Races of *Zea mays*: I. Their recognition and classification. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 29(2), 69–88. <https://doi.org/10.2307/2394331>.
- Arellano-Vázquez, J.L., Tut-Couoh, C., María-Ramírez, A., Salinas-Moreno Y. y Taboada-Gaytán, O.R. (2003). Maíz azul de los Valles Altos de México. I. Rendimiento de grano y caracteres agronómicos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26(2), 101-107.
- Cabrera-Toledo, J.M., Carballo-Carballo, A., Mejía-Contreras, J.A., García-de los Santos, G. y Vaquera-Huerta, H. (2019). Caracterización de poblaciones sobresalientes de maíz de la raza Zapalote Chico. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42(3), 269–279.
- Castillo-Nonato, J. y Chávez-Mejía, C. (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, 23–38.
- Chávez-Servia, J.L., Diego-Flores, P. y Carrillo-Rodríguez, J.C. (2011). Complejos raciales de poblaciones de maíz evaluadas en San Martín Huamelulpan, Oaxaca. *Ra Ximhai*, 7(1), 107–115.
- Chávez-Servia, J.L., Diego-Flores, P. y Carrillo-Rodríguez, J.C. (2012). Variación fenotípica de una muestra de maíces de la región de Chalcatongo de Hidalgo, Oaxaca. *Ciencia Ergo Sum*, 19(3), 51–257.
- González-Castro, M.E., Palacios-Rojas, N., Espinoza-Banda A. y Bedoya-Salazar, C.A. (2013). Diversidad genética en maíces nativos mexicanos tropicales. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(Supl. 3-A), 329-338.
- Herrera-Sotero, M.Y., Cruz-Hernández, C.D., Oliart-Rosa, R.M., Chávez-Servia, J.L., Guzmán-Gerónimo, R.I., González-Covarrubias, V., Cruz-Burgos, M. and Rodríguez-Dorantes, M. (2020). Anthocyanins of blue corn and tortilla arrest cell cycle and induce apoptosis on breast and prostate cancer cells. *Nutrition and Cancer*, 72(5), 768–777. <https://doi.org/10.1080/01635581.2019.1654529>.
- López-Romero, G., Santacruz-Varela, A., Muñoz-Orozco, A., Castillo-González, F. Córdova-Téllez, L. y Vaquera-Huerta, H. (2005). Caracterización morfológica de poblaciones nativas de maíz del Istmo de Tehuantepec, México. *Interciencia*, 30(5), 284-290.
- López-Romero, G., Santacruz-Varela, A., Muñoz-Orozco, A., Castillo-González, F., Córdova-Téllez, J. y Vaquera-Huerta, H. (2010). Perfil isoenzimático de maíces nativos del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México. I. Caracterización de grupos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(1), 1-10.
- Luna-Mena, B.M., Altamirano-Cárdenas, J.R., Santoyo-Cortés, V.H. y R. Rendón-Medel, R. (2016). Factores e innovaciones para la adopción de semillas mejoradas de maíz en Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15, 2995-3007.
- Madeiras-Barbosa, P.A., Fritsche-Neto, R., Andrade, M.C., Petrolí, C.D., Burgueño, J., Galli, G., Willcox, M.C., Sonder, K., Vidal-Martínez, V.A., Sifuentes-Ibarra, E. and Molnar, T.L. (2021). Introgression of maize diversity for drought tolerance: subtropical maize landraces as sources of new positive variants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 6912311. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.691211>.
- Magdaleno-Hernández, E., Mejía-Contreras, A., Martínez-Saldaña, T., Jiménez-Velázquez, M.A., Sánchez-Escudero, J. y García-Cué, J.L. (2016). Selección tradicional de semilla de maíz criollo. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 13, 437–447.
- Mercer, K.L. and Perales, H. (2019). Structure of local adaptation across the landscape: flowering time and fitness in Mexican maize (*Zea mays* L. subsp. *mays*) landraces. *Genetic Resources*

- and Crop Evolution*, 66, 27–45.  
<https://doi.org/10.1007/s10722-018-0693-7>.
- Nelimor, C., Badu-Apraku, B., Tetteh, A.Y. and N'guetta, A.S.P. (2019). Assessment of genetic diversity for drought, heat and combined drought and heat stress. *Plants*, 8, 518.  
<https://doi.org/10.3390/plants8110518>.
- Nelimor, C., Badu-Apraku, B., Tetteh, A.Y., Garcia-Oliveira, A.L., and N'guetta, A.S.P. (2020). Assessing the potential of extra-early maturing landraces for improving tolerance to drought, heat, and both combined stresses in maize. *Agronomy*, 10, 318.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy10030318>.
- Perales, H. and Golicher, D. (2014). Mapping the diversity of maize races in Mexico. *PLoS ONE*, 9(12), e114657.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114657>.
- Pressoir, G. and Berthaud, J. (2004). Population structure and strong divergent selection shape phenotypic diversification in maize landraces. *Heredity*, 92, 95–101.
- Ramírez-Jaspeado, A., García-de los Santos, G., Carballo-Carballo, A., Castillo-González, F., Serrato, J.A. y Cadena-Iñiguez, J. (2013). Caracterización morfológica de una muestra etnográfica de maíz (*Zea mays* L.) raza bolita de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(6), 895–907.
- Torres-Escamilla, F., Chávez-Servia, J.L., Diego-Flores, P. y J.C. Carrillo-Rodríguez, J.C. (2019). Variabilidad agromorfológica entre poblaciones de maíz azul y rojo de la Mixteca oaxaqueña, México. *e-CUCBA*, 6(12), 29-48.
- Salinas-Moreno, Y., Pérez-Alonso, J.J. Vázquez-Carrillo, G., Aragón-Cuevas, F. y Velázquez-Cardelas, G.A. (2012). Antocianinas y actividad antioxidante en maíces (*Zea mays* L.) de las razas chalqueño, elotes cónicos y bolita. *Agrociencia*, 46, 693–706.
- SAS Institute Inc. (SAS). (2006). *Base SAS®9.1.3 Procedures Guide*, Volume I. 2nd ed.; SAS Institute Inc. Cary, NC, USA,
- Sierra-Macías, M., Andrés-Meza, P., Palafox-Caballero, A., Meneses-Márquez, I., Francisco-Nicolás, N., Zambada-Martínez, A., Rodríguez-Montalvo, F., Espinosa-Calderón, A. y Tadeo-Robledo, A. (2014). Variación morfológica de maíces nativos (*Zea mays* L.) en el estado de Veracruz, México. *Agro Productividad*, 7(1), 58-65.
- Ureta, C., González, E.J., Espinosa, A., Trueba, A., Piñeiro-Nelson, A. and Álvarez-Buylla E.R. (2020). Maize yield in Mexico under climate change. *Agricultural Systems*, 177, 102697.  
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102697>.
- Wellhausen, E. J., Roberts, L.M. y Hernández, X.E. (1952). *Razas de Maíz en México, su Origen, Características y Distribución*. Folleto Técnico Núm. 5. Oficina de Estudios Especiales, Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D F. 237 p.
- Woodmansee, A. (2022). Maize landraces and drought: seed systems in San Miguel del Valle, Oaxaca, Mexico. *Journal of Ethnobiology*, 42(4), 477–496.  
<https://doi.org/10.2993/0278-0771-42.4.477>.