

DIVERSIDAD FENOTÍPICA DE VARIEDADES E HÍBRIDOS DE MAÍZ EN EL VALLE TOLUCA-ATLACOMULCO, MÉXICO

PHENOTYPIC DIVERSITY OF MAIZE VARIETIES AND HYBRIDS IN THE TOLUCA-ATLACOMULCO VALLEY, MÉXICO

Andrés González Huerta^{1*}, Luis Miguel Vázquez García¹, Jaime Sahagún Castellanos²
y Juan Enrique Rodríguez Pérez²

¹Facultad de Ciencias Agrícolas, Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento, Universidad Autónoma del Estado de México, Campus Universitario El Cerrillo Piedras Blancas. 50000, Toluca, Estado de México. Apartado Postal 435. Tel. y Fax: (722) 29 6 55 18.

²Departamento de Fitotecnia, Programa Universitario de Investigación y Servicio en Olericultura, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Chapingo, Estado de México.

*Autor para correspondencia (agh@uaemex.mx)

RESUMEN

El conocimiento del origen geográfico y genético de los maíces (*Zea mays* L.) de Valles Altos del Centro de México podría ser relevante para el estudio y caracterización de su diversidad fenotípica, conservación *in situ*, mejoramiento genético y generación de tecnología. En el año 2004 se hizo un estudio con el objetivo principal de evaluar la diversidad fenotípica en variedades criollas e híbridos recomendados para siembra comercial en el Valle Toluca-Atlaconmulco, en El Cerrillo Piedras Blancas (dos fechas de siembra), Metepec y Jocotitlán, Edo. de México. En las 25 poblaciones se midió el rendimiento de grano y 11 variables morfológicas de planta y mazorca y fenológicas, en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones por ambiente. Los resultados indicaron que la diversidad fenotípica del maíz en el Valle Toluca-Atlaconmulco se distribuyó en cinco grupos: Palomero Toluqueño, Cacahuacintle, Chalqueño, Cónico-híbridos Cónico - Chalqueño e híbridos de origen racial complejo. Palomero sobresalió por su precocidad, mayor número de hileras de grano y mayor peso volumétrico. Cacahuacintle se diferenció por su mayor diámetro de mazorca y menor número de hileras de grano. Cónico rindió lo mismo que los híbridos de otras razas; su adaptabilidad histórica al Valle contribuiría a la derivación de poblaciones precoces de mayor rendimiento. La raza Chalqueño presentó las mayores dimensiones de planta, duración del ciclo biológico y rendimiento de grano; rindió igual que los híbridos Cónico-Chalqueño, que presentaron una mazorca por planta y altos pesos de grano por mazorca y volumétricos. Los híbridos de origen racial complejo podrían incrementar la heterosis para rendimiento de grano con Cónico-Chalqueño y disminuir las alturas de planta y mazorca, el acame y la esterilidad en Cacahuacintle, Cónico y Chalqueño.

Palabras clave: *Zea mays*, Valles Altos, diversidad fenotípica, análisis de conglomerados, análisis de componentes principales.

SUMMARY

Knowledge of geographic and genetic origin of Highland Mexican maize (*Zea mays* L.) could be relevant in studies and characterization of their phenotypic diversity, *in situ* conservation, plant breeding and technology design. In 2004 the phenotypic diversity of maize varieties and hybrids currently sown in the Toluca-Atlaconmulco Valley, was evaluated through field experiments carried out at El Cerrillo Piedras Blancas (two sowing dates), Metepec, and Jocotitlán, State of México. Twenty-five varieties were evaluated in terms of grain yield and eleven traits which included plant and ear morphology and phenology, in a randomized complete block design with four replicates per location. Results showed that the maize phenotypic diversity in the Toluca-Atlaconmulco Valley can be classified in five groups: Palomero Toluqueño, Cacahuacintle, Chalqueño, Cónico-hybrids Conico-Chalqueño, and hybrids of complex racial origin. The first two groups showed the lowest ear grain yield and highest female sterility, but their grain can reach prices up to six times higher than the standards. Palomero showed the highest earliness, ear row number and volumetric weight. Cacahuacintle showed the largest ear diameter and the lowest ear row number. Grain yield of Cónico was statistically equivalent to hybrids of complex racial origin, but its historic adaptability to the Valley might contribute for the derivation of populations with higher earliness and grain yield. Chalqueño showed the tallest and latest plants and, alongside with hybrids of Cónico-Chalqueño, the largest grain yield with one ear per plant and high volumetric weights. Hybrids of complex racial origin and Cónico-Chalqueño hybrids could increase the heterosis for grain yield and decrease the plant and ear height, lodging, and sterility in Cacahuacintle, Cónico and Chalqueño.

Index words: *Zea mays*, Mexican highlands, phenotypic diversity, cluster analysis, principal components analysis.

INTRODUCCIÓN

Han transcurrido 56 años desde la publicación del trabajo clásico de Wellhausen *et al.* (1951) en el que se propuso la clasificación de la diversidad del maíz (*Zea mays* L.) en México en 25 razas; éste y otros estudios permitieron establecer relaciones con otras razas del país (Ortega y Sánchez, 1989; Sánchez y Goodman, 1992). La heterogeneidad ambiental, el aislamiento geográfico, la recombinación entre razas o poblaciones aledañas, y la selección que los agricultores han realizado para rendimiento o usos culinarios específicos, contribuyeron a su conservación *in situ*, al incremento de su diversidad o a su mejoramiento genético (Eagles y Lothrop, 1994; Vasal *et al.*, 1995). Las razas cultivadas en los Valles Altos del Centro de México, entre 1800 y 2700 m de altitud, son Arrocillo Amarillo, Cacahuacintle, Cónico, Chalqueño y Palomero Toluqueño. Éstas se siembran en 3.5 millones de hectáreas de los Estados de Hidalgo, México, Puebla y Tlaxcala, y 95 % de esta superficie se siembra con criollos de Cónico y Chalqueño (Wellhausen *et al.*, 1951).

En el Valle Toluca-Atlaconulco en el Estado de México, se siembran 250 000 ha de maíz (Niño *et al.*, 1998) y 87 % de los agricultores usan semillas criollas (Herrera *et al.*, 2002) que pertenecen a las cinco razas descritas por Wellhausen *et al.* (1951) para esta región, con excepción de Arrocillo Amarillo. El manejo del cultivo por los agricultores ha incrementado la diversidad de variedades y a la vez mantenido la identidad y variabilidad genética en forma de poblaciones locales; la selección tradicional que ellos han practicado mejoró el rendimiento o la calidad del grano para usos culinarios específicos, pero al seleccionar visualmente por los atributos de la mazorca (Wellhausen *et al.*, 1951), inconscientemente han dejado al azar las alturas de planta y mazorca, el acame de tallo y raíz y el número de plantas con esterilidad femenina; un incremento en el valor de algunas de estas variables está relacionado con una disminución en su potencial de rendimiento (Niño *et al.*, 1998).

Los fitomejoradores han orientado sus actividades hacia la formación de híbridos que podrían superar a los criollos para los caracteres mencionados y otros atributos en el mejoramiento genético para los Valles Altos del Centro de México; se ha considerado una fase de evaluación en campo para valorar caracteres vegetativos y reproductivos, y una segunda fase de la evaluación después de la cosecha con base en las características de la mazorca, el rendimiento *per se* y otros componentes asociados con rendimiento y calidad de grano (Gámez *et al.*, 1996; Velásquez *et al.*, 2005).

El material genético considerado en el presente estudio involucra a un grupo de híbridos recomendados o candidatos a siembra comercial con información poco consistente en la literatura especializada sobre antecedentes de su potencial productivo, de la raza a la que pertenecen y de sus relaciones de parentesco; otro grupo de material genético está integrado de poblaciones criollas que se cultivan en el Valle Toluca-Atlaconulco, con información aún más escasa. El conocimiento del origen geográfico y genético de los genotipos es esencial para definir mejores estrategias para su aprovechamiento, pero no siempre se dispone de esta información; en ocasiones porque se incluyen genotipos que no cuentan con datos pasaporte, como los criollos que siembran los agricultores, y en el caso de los híbridos existen políticas de privacidad en las empresas que no permiten difundir tal información. Estas limitantes motivaron la realización de este estudio, cuyos objetivos fueron valorar la diversidad fenotípica y determinar las relaciones de parentesco de 25 poblaciones de maíz evaluadas en cuatro ambientes del Valle Toluca-Atlaconulco, en el Estado de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localidades de evaluación

Los experimentos se establecieron en el ciclo agrícola primavera – verano de 2004 en Metepec, El Cerrillo Piedras Blancas (fecha 1 en punta de riego, y fecha 2 en temporal o secano) y Jocotitlán; las tres localidades están situadas en el Valle Toluca – Atlaconulco, en el Estado de México. La elección de estas localidades se hizo con base en su ubicación geográfica, altitud, clima, suelo, precipitación, topografía, hidrología y vegetación predominante (Cuadro 1); la descripción del área de estudio la realizaron García (1988) y Niño *et al.* (1998).

Material genético

En un inicio se habían considerado 64 poblaciones de maíz recomendables para siembra comercial en el Valle Toluca-Atlaconulco, pero sólo se consideraron 25 que presentaron suficiente cantidad y calidad de semilla para establecer los cuatro ensayos en el año 2004. Se consideró que este material genético permitiría estudiar la diversidad fenotípica del maíz en esta región debido a que se incluyeron criollos que podrían ser representativos de las cuatro razas descritas por Wellhausen *et al.* (1951). Los tratamientos fueron 12 criollos que podrían pertenecer a las razas Cónico (Ixtilahuaca y San Lucas), Cacahuacintle (Cacahuacintles 1a 6), Chalqueño (Chalqueño, ETA 13 y Negro) y Palomero Toluqueño, así como 13 híbridos formados con germoplasma templado de Valles Altos (AS-721, AS-722, AS-820, Cándor, Gavilán, H-33, H-40, H-

44, H-90E, HIT-3, HIT-7, VS-46E y Z-60). Ixtlahuaca, de la raza Cónico (Nava y Mejía, 2002) y Cacahuacintle 5 (González *et al.*, 2006), son los únicos materiales documentados en la literatura especializada; la primera es de grano cremoso, ciclo biológico intermedio – precoz,

con rendimiento de grano entre 3.5 y 7.1 t ha⁻¹, y está bien adaptado a siembras de secano en el área de estudio (Niño *et al.*, 1998; Nava *et al.*, 2000). Sólo de HIT-3, HIT-7, H-33, H-40, H-44 y H-90E se obtuvo información de su origen geográfico y genético (Cuadro 2).

Cuadro 1. Características geográficas y climáticas de las localidades del Valle Toluca-Atlaconmulco del Estado de México en donde se establecieron los experimentos de maíz, 2004. Fuentes: García (1988); Niño *et al.* (1998).

Característica	Metepec	El Cerrillo Piedras Blancas	Jocotitlán
Latitud Norte	19° 13'	19° 17'	19° 42'
Longitud Oeste	99° 35'	99° 39'	99° 43'
Altura sobre el nivel del mar (m)	2600	2640	2553
Clima predominante	Cb(w ₂)(w)ig	Cb(w ₂)(w)ig	Cb(w ₁)(w)ig
Suelo predominante	Andosol	Vertisol	Planosol mólico
Precipitación media anual (mm)	980	790	669
Topoformas	Llanura	Llanura	Llanura
Hidrología	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Vegetación predominante	Gramíneas (Cesposas)	Pastizales y chaparrales	Pastizales y chaparrales

Cuadro 2. Material genético considerado en el presente estudio.

Código	Población	Municipio de colecta	Raza
20	Ixtlahuaca	Ixtlahuaca	Cónico
23	San Lucas	Metepec	Cónico
12	ETA 13	Jocotitlán	Chalqueño
11	Chalqueño	Chalco-Amecameca	Chalqueño
21	Negro	Jiquipilco	Chalqueño
4 a 9	Cacahuacintle 1 a 6	Valle de Toluca	Cacahuacintle
22	Palomero Toluqueño	Valle de Toluca	Palomero Toluqueño

Código	Híbrido	Genealogía¶	Institución o Empresa	Tipo de híbrido
18	HIT-3	(CML239xCML242)xM349	ICAMEX	Triple
19	HIT-7	(CML239xCML242)xIML-6	ICAMEX	Triple
14	H-33	(M28xM27)x(M18xM17)	INIFAP	Doble
15	H-40	(CML246xCML242)xM39	INIFAP	Triple
16	H-44	(M46xM47)xM48	INIFAP	Triple
17	H-90E (H-52)	(M43xM44)xM48	INIFAP	Triple
10	Cóndor	No disponible	ASGROW	Triple
13	Gavilán	No disponible	ASGROW	Doble
1	AS-721	No disponible	ASPROS	Doble
2	AS-722	No disponible	ASPROS	Triple
3	AS-820	No disponible	ASPROS	Triple
24	VS-46E	No disponible	INIFAP	Sintético
25	Z-60	No disponible	ASGROW	Triple

[¶] CML239, CML242 derivadas de la población 85, grupo heterótico "A"; CML349 derivada de reciclaje de material de Valles Altos, grupo heterótico "B"; CML246 derivada de la Población 800, grupo heterótico "B" (CIMMYT; Torres, Com. personal¹). IML-6 derivada de una población de la raza Cónico (ICAMEX, De la Cruz, Com. personal²). M17, M18, M27, M28, M39, M43, M44, M46, derivadas de Mich- 21; M47 derivada de Tlax-77; M48 derivada de Tlax-86. Las diez líneas del INIFAP (M-) que forman H-33, H-40, H-44 y H-90E pertenecen a la raza Cónico-Chalqueño (Díaz, Com. personal³; Virgen, Com. personal⁴).

¹M. C. José Luis Torres Flores. Jefe del Programa de Mejoramiento Genético de Maíz de Valles Altos, Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT), km 45 Carretera México-Veracruz. 56300, El Batán, Estado de México.

²M. C. Pascual de la Cruz Díaz. Jefe del Programa de Maíz, Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuicola y Forestal del Estado de México (ICAMEX), Conjunto Sedagro, Metepec, Estado de México.

³M. C. Carlos Díaz Hernández. Programa de Maíz, Campo Experimental Valle de Toluca, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 52140, Metepec, Estado de México.

⁴M. C. Juan Virgen Vargas. Programa Tecnología de Semillas, Campo Experimental Valle de México, INIFAP. km 18.5 Carretera Los Reyes-Lechería. 56230, Chapingo, Estado de México.

Diseño y parcela experimental

Las 25 poblaciones fueron distribuidas en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones por ambiente. La parcela experimental constó de tres surcos de 6.0 x 0.80 m; cada surco constó de 11 matas distanciadas a 0.60 m y en cada mata se establecieron tres plantas. La hilera central de cada parcela fue la unidad experimental útil (área de 4.8 m²).

Manejo de los experimentos

La preparación del suelo con tractor consistió en un barbecho, una cruz y una rastra. Antes del surcado se fertilizó con la dosis 70N-80P-30K. La siembra manual se efectuó el 7 (Jocotitlán), 12 (El Cerrillo fecha 1), 14 (Metepec) y 26 de abril (El Cerrillo fecha 2); se depositaron cuatro semillas por mata y cuando las plántulas tenían una altura entre 20 y 25 cm se aclareó a tres plantas por mata (62 500 plantas ha⁻¹). Con la segunda labor cultural se incorporó el nitrógeno restante e inmediatamente se aplicó atrazina y 2,4-D amina, en dosis de 1.5 kg y 1.5 L ha⁻¹, respectivamente, ambos disueltos en 200 L de agua; esta actividad permitió complementar el control de maleza manual y mecánico efectuado antes de los 90 d de establecidos los experimentos. La cosecha se efectuó en la primera y segunda semana de diciembre, después que el cultivo había alcanzado la madurez fisiológica.

Variables registradas

Los caracteres registrados fueron: floración masculina (DFM; días transcurridos desde la siembra hasta que 50 % de las plantas derramaban polen), número de plantas en la parcela útil (PPP), altura de planta (ALTP; medida en m desde la superficie del suelo hasta la lígula de la hoja bandera), altura de mazorca (ALTM; medida en m desde la superficie del suelo hasta el nudo de inserción de la mazorca principal), porcentaje de acame de tallo y raíz (ACAM), número de mazorcas cosechadas (NMC), longitud de mazorca (LM; medida en cm desde la base hasta la punta de la mazorca), diámetro de mazorca (DM; de su parte media, en cm), número de hileras de grano por mazorca (NHM), peso de olote (POM, en g) y de grano por mazorca (PGM, en g), peso volumétrico del grano (PVG; medido en g L⁻¹), índice de prolificidad (IP; cociente entre NMC y PPP) y rendimiento de grano (producción de grano estandarizado a 14 % de humedad, expresado en kg). Con los datos del rendimiento de grano por parcela se estimó el rendimiento en toneladas por hectárea (RGHA). La información para AP, AM, LM, DM, NHM, POM y PGM corresponden a ocho datos por unidad experimental útil (UEU); para el resto de las

variables se consideró al total de plantas de la UEU (CIMMYT, 1999).

Análisis estadístico

Se calcularon análisis de varianza combinando la serie de cuatro experimentos para las 12 variables y la comparación de medias entre poblaciones se efectuó con la prueba de Tukey al nivel de significancia de 1 % (Martínez, 1988; Sahagún, 1993). El análisis estadístico se efectuó con el paquete Agrobase 21, y se consideró a los ambientes (A), a las poblaciones (G) y a la interacción G x A como factores de efectos fijos. Desde una perspectiva multivariada se hizo un análisis de componentes principales, previa estandarización de los datos y una rotación de tipo Varimax en los componentes resultantes para determinar la correlación entre las variables originales con cada uno de los dos primeros componentes principales, más un análisis de conglomerados con base en las distancias euclidianas al cuadrado y definición de grupos a una distancia de 50.0, según el método del vecino más lejano aplicado sobre la matriz de datos compuesta por cada una de las poblaciones de maíz, en hileras y los promedios a través de los ambientes de evaluación de las 12 variables, en columnas. Los procedimientos seguidos para ambos análisis fueron descritos por Johnson y Wichern (1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza y ambientes de evaluación

En cada variable estudiada se detectó significancia ($P \leq 0.01$) entre ambientes (A) y entre poblaciones de maíz (G), y de la interacción G x A (IGA), para floración masculina, acame, peso de olote y de grano por mazorca, peso volumétrico del grano, rendimiento de grano por hectárea e índice de prolificidad (Cuadro 3). La heterogeneidad entre ambientes se atribuye principalmente a las diferencias entre El Cerrillo y los otros dos sitios (Metepec y Jocotitlán) en ambas fechas de siembra (12 y 26 de abril). La diferencia significativa que se detectó en rendimiento entre ambos grupos, de 2.0 a 2.5 t ha⁻¹, se explica por la mejor expresión fenotípica que se presentó en el primer grupo en las alturas de planta y mazorca, en las características de la mazorca y en el peso volumétrico (Cuadro 4). Según García (1988) y Niño *et al.* (1998), en este valle hay heterogeneidad en precipitación, temperatura, altitud y tipo de suelo (Cuadro 1), que permite diferenciar las localidades que lo conforman. En 2004 en El Cerrillo, Metepec y Jocotitlán se registraron 1114, 938 y 806 mm de lluvia, respectivamente; como estos valores fueron superiores al promedio anual de cada localidad, se deduce que en El Cerrillo el suelo vertisol,

por haber tenido problemas de drenaje debido a la lluvia abundante, causó una disminución en las alturas de planta y mazorca e incrementó el acame, por lo que el rendimiento de grano y sus componentes primarios se afectaron negativamente (Cuadro 4).

Se observaron también diferencias significativas entre poblaciones para las variables analizadas (Cuadro 5) que podrían estar relacionadas con su origen geográfico y genético (Cuadro 2). La interacción G x A, debida a cambios de ordenamiento de las poblaciones a través de los ambientes de evaluación, indicó que al menos una población tuvo mejor adaptación a un ambiente específico; este hecho es importante en la agricultura, pues su efecto en la estimación de parámetros genéticos puede afectar al progreso de la selección al limitar seriamente la certeza de elegir genotipos superiores (Crossa, 1990).

Análisis de conglomerados

El agrupamiento de las 25 poblaciones de maíz en función de las 12 variables evaluadas, con una distancia euclidiana promedio de 50 y con datos estandarizados, dio origen a cinco grupos (Figura 1).

En el Grupo 1 se identificó a Palomero Toluqueño, maíz reventador con dimensiones de planta, mazorca y grano pequeños, usado en la obtención de aceite y jabón, para alimentar aves y ganado y en la elaboración de palomitas y otras confituras (Wellhausen *et al.*, 1951; Romero *et al.*, 2006). Esta raza predominó en el Valle de Toluca pero hoy está a punto de desaparecer ya que se usa casi únicamente para resiembra (Romero *et al.*, 2006). Por su constitución de nudos cromosómicos, McClintock *et al.* (1981) plantean su influencia en la diversificación de Cónico-Palomero Toluqueño en el norte y centro de Puebla, del Chalqueño en Tlaxcala, del Cónico Norteño en Querétaro, del Chalqueño Pepitilla en Michoacán y del Cónico Norteño-Chalqueño y Celaya-Cónico en Guanajuato.

Cuadro 3. Media, coeficiente de variación, cuadrados medios y significancia estadística de los valores de F del análisis de varianza combinado (cuatro ambientes) de 12 caracteres¹. Valle Toluca-Atacomulco, Estado de México, 2004.

F V	GL	DFM	AP	AM	ACM	LM	DM	NHM	POM	PGM	RGH	PVG	IP
Ambientes (A)	3	281.2**	5.02**	2.36**	1366.6**	60.96**	0.53**	5.1**	328.0**	35700**	195.4**	21200**	0.21**
Repeticiones/A	12	13.9	0.10	0.05	162.4	0.74	0.02	0.5	6.2	259	1.2	497	0.02
Genotipos (G)	24	400.9**	1.04**	0.94**	3911.3**	11.35**	2.80**	87.5**	226.0**	487**	6.2**	69409**	0.21**
GxA	72	3.8**	0.02ns	0.01ns	264.8**	0.49ns	0.02ns	0.7ns	6.9*	263**	1.2**	486**	0.03**
Error	288	3.3	0.02	0.01	57.7	0.47	0.02	0.6	4.7	170	0.6	256	0.01
Media		97.8	2.49	1.44	32.7	14.09	4.89	15.7	19.9	130	6.3	753	0.91
C V (%)		1.8	5.25	7.78	23.2	4.87	2.73	4.9	10.8	10	12.8	2	13.4

¹DFM = Días a floración masculina; AP = Altura de planta; AM = Altura de mazorca; ACM = Acame; LM = Longitud de mazorca; DM = Diámetro de mazorca; NHM = Número de hileras de la mazorca; POM = Peso de olote por mazorca; PGM = Peso de grano por mazorca; PVG = Peso volumétrico del grano; RGH = Rendimiento de grano por hectárea; IP = índice de prolificidad. F V = Fuente de variación; C V = Coeficiente de variación.

Cuadro 4. Promedios por ambiente de cada variable¹. Valle Toluca - Atacomulco, Estado de México, 2004.

Ambiente	DFM	AP	AM	ACM	LM	DM	NHM	POM	PGM	RGH	PVG	IP
El Cerrillo Piedras Blancas (fecha 1)	96.9	2.47	1.40	31.2	13.29	4.83	15.78	18.63	119.38	5.39	754.3	0.88
El Cerrillo Piedras Blancas (fecha 2)	100.3	2.22	1.27	37.9	13.55	4.82	15.40	18.17	109.26	4.95	734.2	0.97
Metepec	96.9	2.77	1.64	31.8	14.69	4.97	15.76	21.53	146.26	7.48	769.5	0.94
Jocotitlán	97.1	2.49	1.45	29.9	14.82	4.94	15.93	21.51	146.03	7.65	755.8	0.87
Tukey (P < 0.01)	1.6	0.14	0.10	5.6	0.38	0.06	0.31	1.10	7.15	0.49	9.4	0.63

¹DFM = Días a floración masculina; AP = Altura de planta (m); AM = Altura de mazorca (m); ACM = Acame (%); LM = Longitud de mazorca (cm); DM = Diámetro de mazorca (cm); NHM = Número de hileras de la mazorca; POM = Peso de olote por mazorca (g); PGM = Peso de grano por mazorca (g); PVG = Peso volumétrico del grano (g L⁻¹); RGH = Rendimiento de grano por hectárea (t ha⁻¹); IP = Índice de prolificidad (núm. mazorcas/núm. plantas).

Cuadro 5. Comparación de medias de 25 poblaciones de maíz evaluadas en el Valle Toluca-Atlaconulco, Estado de México, 2004.

Código	Variedad / Raza	DFM	AP	AM	ACM	LM	DM	NHM	POM	PGM	PVG	RGH	IP
6	Cacahuacintle 3	92.8	2.60	1.47	47.3	14.65	5.36	13.59	20.0	115.1	654	5.08	0.84
9	Cacahuacintle 6	93.4	2.67	1.57	45.9	14.38	5.37	13.42	20.3	112.4	659	5.04	0.84
5	Cacahuacintle 2	91.7	2.65	1.53	53.2	14.27	5.34	13.75	18.9	109.7	654	4.84	0.81
4	Cacahuacintle 1	96.6	2.75	1.62	52.7	14.21	5.66	12.68	25.1	109.8	627	4.57	0.73
7	Cacahuacintle 4	94.4	2.75	1.65	53.7	14.07	5.52	12.75	21.7	109.6	642	4.55	0.79
8	Cacahuacintle 5	97.0	2.73	1.64	53.0	14.04	5.59	12.21	23.1	108.5	625	4.47	0.73
	Cacahuacintle	94.3	2.7	1.6	51.0	14.3	5.5	13.1	21.5	110.9	643	4.76	0.79
12	ETA 13	106.1	3.00	1.90	42.3	14.90	5.18	18.28	25.0	165.8	759	7.91	0.81
11	Chalqueño	98.5	2.89	1.82	45.7	14.18	5.14	14.68	17.2	162.7	741	7.48	0.74
21	Negro	106.1	2.99	2.01	49.6	14.32	4.93	15.39	15.9	153.3	738	7.12	0.78
	Chalqueño (CH)	103.6	3.0	1.9	45.9	14.5	5.1	16.1	19.4	160.6	746	7.50	0.78
23	San Lucas	88.0	2.41	1.39	48.6	13.81	4.73	16.70	15.6	143.3	780	6.65	0.88
20	Ixtlahuaca	92.8	2.34	1.34	31.9	14.28	4.39	16.90	15.1	126.7	795	6.46	0.85
	Cónico (C)	90.4	2.4	1.4	40.3	14.0	4.6	16.8	15.4	135.0	787	6.55	0.87
17	H-90E	97.5	2.42	1.50	30.4	14.43	4.84	18.09	18.7	156.2	795	8.71	0.99
16	H-44	99.0	2.31	1.42	28.4	14.09	4.66	17.68	17.0	142.6	799	7.92	1.03
14	H-33	99.0	2.64	1.60	36.4	13.65	5.20	18.45	22.5	161.0	763	7.56	0.97
	Híbridos C-CH	98.5	2.5	1.5	31.7	14.1	4.9	18.1	19.4	153.3	786	8.06	1.00
15	H-40	103.1	2.23	1.24	16.8	14.44	4.78	16.37	21.9	138.8	789	7.78	1.05
10	Cóndor	103.2	2.44	1.38	10.4	14.88	4.51	16.82	18.9	137.6	810	7.51	1.00
2	AS-722	98.8	2.38	1.33	10.4	14.11	4.80	15.20	23.1	140.9	789	7.33	0.96
13	Gavilán	101.7	2.14	1.10	16.2	14.51	4.70	16.62	22.5	135.5	799	6.66	1.11
1	AS-721	101.5	2.30	1.30	17.0	13.69	4.73	15.73	22.2	130.9	786	6.57	1.02
25	Z-60	99.4	2.24	1.13	14.6	14.66	4.38	14.45	18.9	128.2	811	6.46	1.06
24	VS-46E	96.7	2.30	1.27	28.3	14.22	4.55	15.84	19.8	125.8	802	6.25	1.00
19	HIT-7	103.8	2.40	1.24	19.4	14.54	4.55	14.78	23.4	122.7	796	6.17	1.01
3	AS-820	98.5	2.20	1.15	10.7	13.56	4.60	14.62	21.3	116.2	802	6.14	1.03
18	HIT-3	97.6	2.28	1.17	13.7	13.87	4.60	14.96	22.0	123.0	805	5.92	0.99
	Híbridos de otra raza	100.4	2.3	1.2	15.8	14.2	4.6	15.5	21.4	130.0	799	6.68	1.02
22	Palomero Toluqueño	87.1	2.21	1.26	41.0	10.41	4.10	23.01	8.0	85.1	803	4.10	0.82
	Tukey (0.01)	2.7	0.19	0.16	11.1	1.00	0.19	1.13	2.45	19.1	23.5	1.20	0.18

Las variables fueron definidas en los Cuadros 3 y 4.

El Grupo 2 estuvo integrado por híbridos con origen racial complejo: HIT-3, AS-820, VS-46E, Z-60, HIT-7, AS-721, AS-722, Gavilán, H-40 y Cóndor, que presentaron las menores alturas de planta y mazorca, los menores porcentajes de acame, una mazorca por planta y altos pesos volumétricos del grano. HIT-3 y HIT-7 están constituidos por tres y dos líneas del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), respectivamente, y comparten la misma hembra. H-40 está constituido por dos líneas endogámicas del CIMMYT y una línea del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Cuadro 2). Estos resultados sugieren que los progenitores del resto de los híbridos podrían ser líneas de Valles Altos del CIMMYT, derivadas de compuestos de amplia base genética con origen racial complejo, o de la raza Cónico-Chalqueño.

El Grupo 3 incluyó poblaciones locales de la raza Cónico, como Ixtlahuaca y San Lucas, e híbridos de origen Cónico-Chalqueño, como H-33, H-44 y H-90E. El criollo de Ixtlahuaca, colectado en el Estado de México, fue propuesto por Nava y Mejía (2002) como Cónico. Los criollos Ixtlahuaca y San Lucas fueron colectados en Ixtlahuaca y Metepec, donde predomina ampliamente la raza Cónico (Wellhausen *et al.*, 1951), pero ambos podrían pertenecer a Cónico-Chalqueño, debido a que comparten el mismo grupo con H-33, H-44 y H-90E, que tienen progenitores de estas razas, y además presentaron mayores dimensiones de planta y de ciclo biológico que las poblaciones típicas de Cónico descritas por Ortega y Sánchez (1989). Cónico y Chalqueño predominan en los Valles Altos del Centro de México, pues se cultivan en 3.5 millones de hectáreas y están relacionadas genéticamente; los progenitores putativos de Cónico fueron Palomero Toluqueño y Cacahuacintle, y Cónico también fue progenitor de Chalqueño (Wellhausen *et al.*, 1951).

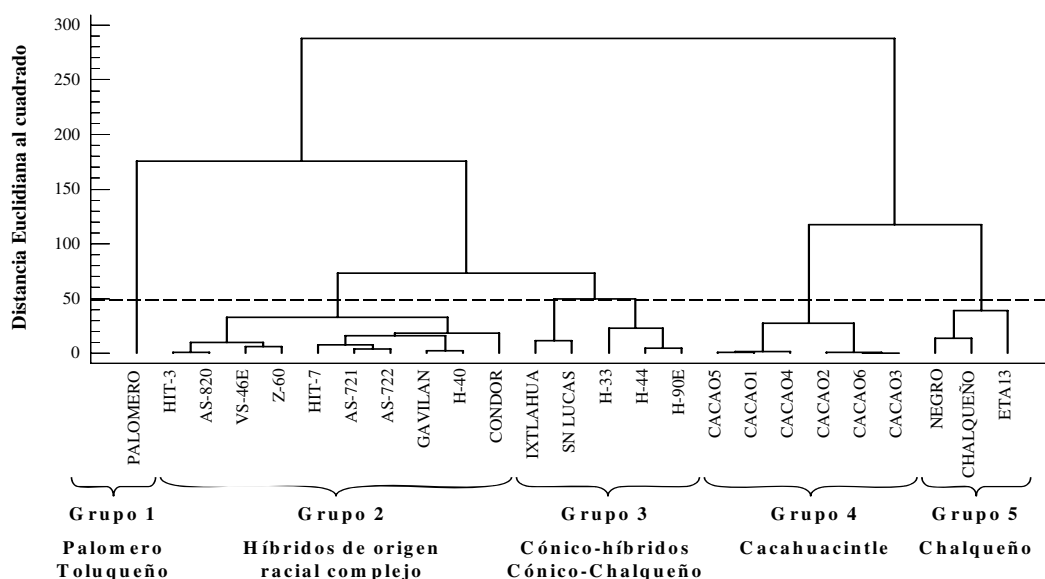


Figura 1. Agrupación de las 25 poblaciones de maíz con base en la distancia Euclidiana al cuadrado, con base en las medias aritméticas de 12 variables promediadas sobre repeticiones y ambientes.

El Grupo 4 se integró con los Cacahuacintles colectados en el Valle de Toluca. El grano blanco, harinoso y grande que caracteriza a esta raza se usa en la elaboración de pozole, harinas, tamales y pinole, y la mazorca inmadura (elote), de excelente calidad, se consume como hortaliza. En el Estado de México se cultiva principalmente en los municipios de Toluca, Calimaya, Capultitlán, Metepec, San Mateo Atenco y Tenango del Valle. Esta raza fue un progenitor putativo de Cónico, el maíz predominante en el Valle Toluca-Atacomulco, así como de Chalqueño y Cónico Norteño (Wellhausen *et al.*, 1951).

En el Grupo 5 se identificó a las poblaciones de raza Chalqueño, que fue formada según Wellhausen *et al.* (1951) por Cónico y Tuxpeño (Olotillo x Tepecintle). Las poblaciones Negro, Chalqueño y ETA 13, recomendadas para siembras en punta de riego debido a su mayor ciclo biológico, presentaron mayores alturas de planta y mazorca, peso de grano por mazorca y granos grandes y pesados. Chalqueño fue colectado en el área Chalco - Amecameca y ETA 13 y Negro lo fueron en Jicotitlán y Jiquipilco, municipios vecinos de Ixtlahuaca con altitud de 2550 m. Herrera *et al.* (2004) determinaron que la diversidad de esta raza es compleja y que puede dividirse en Chalqueño Cremoso, Elotes Chalqueños y Chalqueño Palomo; su estudio se refirió a la región Chalco-Amecameca-Juchitepec, pero el patrón de diversidad se podría presentar en regiones aledañas a la anterior en el

Estado de México, y en los Estados de Guanajuato, Michoacán, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala (Wellhausen *et al.*, 1951).

El análisis de grupos permitió una agrupación confiable de las poblaciones con base en los caracteres evaluados y su origen geográfico y genético; no obstante, es recomendable una mayor exploración. El uso de poblaciones sobresalientes o con datos pasaporte, así como variables con mayor estabilidad, como las que emplearon Ortega y Sánchez (1989), Sánchez y Goodman (1992) y Herrera *et al.* (2004), serían de gran utilidad en estudios futuros para evaluar la diversidad del maíz en el Valle Toluca-Atacomulco y, especialmente, para determinar las interrelaciones entre éstas y otras poblaciones de genealogía desconocida.

Componentes principales

De la variabilidad total observada en las 25 poblaciones de maíz con base en las 12 variables registradas (Figura 2), las dos primeras componentes principales explicaron 71.8 %. El componente 1 (43.8 %) presentó una mayor asociación positiva con altura de planta (ALTP), altura de mazorca (ALTM), acame (ACAM) y diámetro de mazorca (DM), y negativa con el peso volumétrico del grano (PVG) e índice de prolificidad (IP); el componente 2 (28.0 %) estuvo determinado principalmente por floración

masculina (DFM), peso de grano por mazorca (PGM) y rendimiento de grano por hectárea (RGHA).

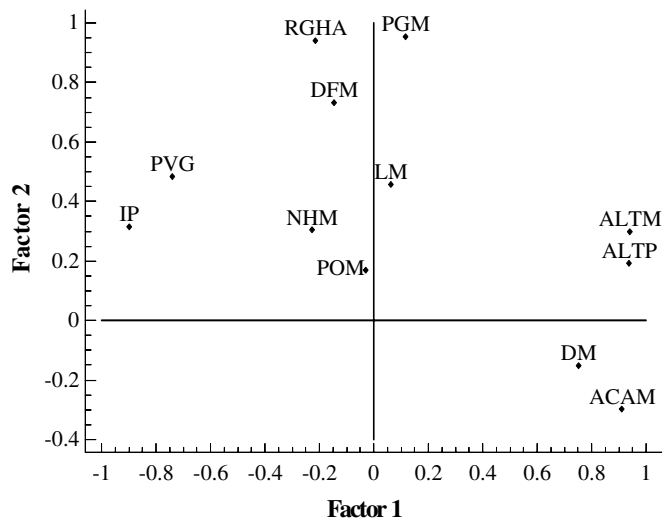


Figura 2. Dispersión de 12 variables medidas, en el plano determinado por las dos primeras componentes principales (Factor 1= 43.8 %; Factor 2= 28.0 %).

Estos resultados muestran que en el incremento de la productividad de los maíces de los Valles Altos del Centro de México se han considerado las dimensiones de la planta de manera independiente a las del desarrollo reproductivo, de las características de mazorca y del rendimiento, de modo que en un programa de mejoramiento genético que involucre a este material podrían derivarse poblaciones de menor porte, resistentes al acame, con mejores características de mazorca y con un menor número de plantas estériles. Herrera *et al.* (2000) concluyeron que la valoración de las estructuras reproductivas, de mazorca, de grano y de olote, podría considerarse como el criterio morfológico más importante para la clasificación racial entre y dentro de razas de maíz.

Comparación entre grupos de poblaciones

Palomero Toluqueño y Cacahuacintle, caracterizados por sus granos reventador y harinoso, respectivamente, fueron las razas de menor productividad de grano (4.1 y 4.7 t ha⁻¹), muy susceptibles al acame (41 y 51 %), con problemas de esterilidad femenina (0.82 y 0.79) y con bajos pesos de grano por mazorca (85.1 y 110.9 g). Sin embargo, estas limitantes se compensan con una mayor demanda en el mercado, ya que su grano se ha comercializado a un precio hasta seis veces mayor que el de maíces destinados a la elaboración de tortillas (Arellano *et al.*, 2003; González *et al.*, 2006). Palomero Toluqueño podría emplearse como progenitor de poblaciones

precoces, de menor porte, con mayor número de hileras y grano más pesado. Cacahuacintle, por su mayor diámetro de mazorca, menor número de hileras de grano y sus granos blancos, grandes y harinosos, podría emplearse en el mejoramiento de variedades para la producción de elote, o de grano de mejor calidad para la elaboración de harina o de pozole. González *et al.* (2006), al comparar sus resultados con los de Wellhausen *et al.* (1951), observaron que la altura de planta promedio de Cacahuacintle fue superior en más de 40 cm, el número de hileras de la mazorca menor, 15.20 vs. 12.39, y el diámetro de mazorca mayor, 4.90 vs. 5.54 cm. Asimismo, el rendimiento de grano de las 30 poblaciones que evaluaron varió en el intervalo de 4.06 a 6.37 t ha⁻¹.

El planteamiento anterior puede verificarse al observar el comportamiento de Cónico, el maíz predominante en el Valle Toluca-Atlaconulco, cuyos progenitores putativos fueron Palomero Toluqueño y Cacahuacintle (Wellhausen *et al.*, 1951). Cónico (6.55 t ha⁻¹) rindió en magnitud equivalente a los híbridos de otras razas (6.68 t ha⁻¹), pero su mayor adaptabilidad al Valle permitiría derivar poblaciones precoces de mayor rendimiento y mejores componentes del rendimiento. Nava y Mejía (2002) concluyeron que la raza Cónico se agrupó con mayor frecuencia con Cónico-Norteño y Chalqueño, y con menor frecuencia con Elotes Cónicos y Bolita; el grupo presentó 90 d a floración masculina, alturas de planta y mazorca de 199 y 120 cm, y diámetro y longitud de mazorca de 4.0 y 11 cm, respectivamente.

La raza Chalqueño presentó mayores dimensiones de planta (3.0 y 1.9 m para altura de planta y mazorca), de ciclo biológico (103.6 días a floración) y de susceptibilidad al acame (45.9 %), pero su germoplasma es valioso porque presentó el mayor rendimiento de grano por mazorca (160.6 g) y su producción de grano por hectárea fue equivalente a la de los híbridos Cónico-Chalqueño (8.06 t ha⁻¹), que sobresalieron también por presentar una mazorca por planta y altos pesos de grano por mazorca (153.3 g) y volumétricos (786 g L⁻¹). Arellano *et al.* (2003) identificaron variedades criollas representativas de la raza Chalqueño con rendimientos entre 8.7 y 10.5 t ha⁻¹ en la localidad de El Seco, Puebla, mientras que al promediar los rendimientos a través de las localidades detectaron que el criollo Méx-258 fue la única población sobresaliente con 6.4 t ha⁻¹.

Los híbridos de otra raza, por tener germoplasma del CIMMYT y adaptabilidad a los Valles Altos, podrían ser de gran utilidad para incrementar la heterosis con Cónico-Chalqueño o para disminuir las alturas de planta y mazorca, el acame y los problema de esterilidad que

presentaron las poblaciones de Cacahuacintle, Cónico y Chalqueño.

Estos resultados demuestran que existe variabilidad genética que podría emplearse para explotar la heterosis entre razas e incrementar el rendimiento o mejorar las características de planta y mazorca asociadas a una mayor calidad de grano, según el propósito de su cultivo. La superioridad de la raza Chalqueño, que refleja la participación de los agricultores, y de los híbridos Cónico-Chalqueño, que muestran la contribución de los fitomejoradores, con relaciones ancestrales comunes hacia Palomero Toluqueño y Cacahuacintle, evidencian los avances significativos que se han obtenido en los Valles Altos del Centro de México.

CONCLUSIONES

La diversidad fenotípica del maíz en el Valle Toluca-Atlaconulco se clasificó en cinco grupos: Palomero Toluqueño, Cacahuacintle, Chalqueño, Cónico-híbridos Cónico-Chalqueño y híbridos de origen racial complejo. Los dos primeros grupos que poseen las menores dimensiones en mazorca, rendimiento de grano y esterilidad femenina, se comercializan a un precio hasta seis veces mayor que el resto de las poblaciones. Palomero sobresalió por su precocidad, mayor número de hileras de grano y alto peso volumétrico. Cacahuacintle se diferenció por su mayor diámetro de mazorca y menor número de hileras de grano. Cónico rindió en magnitud equivalente que los híbridos de origen racial complejo; su mayor adaptabilidad al Valle contribuiría a la derivación de poblaciones precoces de mayor rendimiento. La raza Chalqueño presentó las mayores dimensiones de planta y desarrollo reproductivo, así como de rendimientos de grano por mazorca y por hectárea; ésta rindió lo mismo que los híbridos Cónico-Chalqueño, que tuvieron el mayor rendimiento de grano con una mazorca por planta y altos pesos de grano por mazorca y volumétricos. Los híbridos de origen racial complejo, como material de partida para mejoramiento genético, podrían presentar buena heterosis con Cónico-Chalqueño o ser útiles para disminuir las alturas de planta y mazorca, el acame y la esterilidad en Cacahuacintle, Cónico y Chalqueño.

AGRADECIMIENTOS

A ASGROW, ASPROS, INIFAP, Artemio Balbuena M., Luis Aguilar M., Luis González D. y Juan Reyes C., por proporcionar semilla. De manera muy especial a la ETA No. 13 (Ing. Roberto González) y al ICAMEX (Ing. Jaime Segura L.), por proporcionar semilla y el terreno donde se establecieron los experimentos en el año 2004 en las localidades de Jocotitlán y Metepec. A ambos árbitros

y al editor asignados, así como al revisor de estilo, por sus excelentes comentarios y sugerencias que nos permitieron mejorar la presentación y el contenido del manuscrito original.

BIBLIOGRAFÍA

- Arellano V J L, C Tut C, A María R, Y Salinas M, O R Taboada G (2003) Maíz azul de los Valles Altos de México. I. Rendimiento de grano y caracteres agronómicos. *Rev. Fitotec. Mex.* 26: 101-108.
- CIMMYT (1999) Manejo de los Ensayos e Informe de los Datos para el Programa de Ensayos Internacionales de Maíz del CIMMYT. 5a reimp. México, D. F. 21 p.
- Crossa, J (1990) Statistical analysis of multilocations trials. *Adv. Agron.* 44:55-85.
- Eagles H A, J E Lothrop (1994) Highland maize from Central Mexico – Its origin, characteristics and use in breeding programs. *Crop Sci.* 34:11-19.
- Gámez V A J, M A Ávila P, H Ángeles A, C Díaz H, H Ramírez V, A Alejo J, A Terrón I (1996) Híbridos y Variedades de Maíz Liberados por el INIFAP hasta 1996. Publicación Esp. No.16, INIFAP. Toluca, México. 102 p.
- García E (1988) Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto Nacional de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 246 p.
- González H A, J Sahagún C, D J Pérez L, A Domínguez L, R Serrato C, V Landeros F, E Dorantes C (2006) Diversidad fenotípica del maíz Cacahuacintle en El Valle de Toluca, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 29:255-261.
- Herrera C B E, F Castillo G, J J Sánchez G, R Ortega P, M M Goodman (2000) Caracteres morfológicos para valorar la diversidad entre poblaciones de maíz en una región: Caso la Raza Chalqueño. *Rev. Fitotec. Mex.* 23:335-353.
- Herrera C B E, A Macías L, R Díaz R, M Valadez R, A Delgado A (2002) Uso de semilla criolla y caracteres de mazorca para la selección de semilla de maíz en México. *Rev. Fitotec. Mex.* 25:17-24.
- Herrera C B E, F Castillo G, J J Sánchez G, J M Hernández C, R Ortega P, M M. Goodman (2004). Diversidad del maíz Chalqueño. *Agrociencia* 38:191-206.
- Johnson F A, D W Wichern (1999) Applied Multivariate Statistical Analysis. 4th ed. Prentice Hall. 816 p.
- Martínez G A (1988) Diseños Experimentales, Métodos y Elementos de Teoría. Trillas, México. 756 p.
- McClintock B, T A Kato Y, A Blumenschein (1981) Constitución Cromosómica de las Razas de Maíz. Su Significado en la Interpretación de Relaciones entre las Razas y Variedades en las Américas. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Edo. de México. 521 p.
- Nava P F, J A Mejía C, F Castillo G, J D Molina G (2000) Evaluación de maíces precoces e intermedios en Valles Altos Centrales de México. I. Poblaciones sobresalientes. *Rev. Fitotec. Mex.* 23:119-128.
- Nava P F, J A Mejía C (2002) Evaluación de maíces precoces e intermedios en Valles Altos Centrales de México. II. Divergencia genética. *Rev. Fitotec. Mex.* 25:187-192.
- Niño C V, C Nicolás M, D J Pérez L, A González H (1998) Estudio de trece híbridos y cinco variedades de maíz en tres localidades del Valle Toluca- Atlaconulco. *Rev. Ciencias Agrícolas Informa* 12:33-43.
- Ortega P R, J Sánchez G (1989) Aportaciones al estudio de la diversidad de maíz en las partes altas de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 12:105-119.

- Romero C T, L González D, G Reyes R (2006)** Geografía e historia cultural del maíz Palomero Toluqueño (*Zea mays* everta). Ciencia Ergo Sum 13:47-56.
- Sahagún C J (1993)** Funcionalidad de cuatro modelos para las evaluaciones genotípicas en series de experimentos. Rev. Fitotec. Mex. 16:161-171.
- Sánchez G J J, M M Goodman (1992)** Relationships among the Mexican races of maize. Econ. Bot. 46:72-85.
- Vasal S K, G Srinivasan, N Vergara A, F González C (1995)** Heterosis y aptitud combinatoria en germoplasma de maíz de Valles Altos. Rev. Fitotec. Mex. 18:123 -139.
- Velásquez C G A, C Tut C, J Lothrop, J Virgen V, Y Salinas M (2005)** H-40, Híbrido de Maíz de Grano Blanco para los Valles Altos de México. Folleto Técnico No. 21, Centro de Investigación Regional del Centro, Campo Experimental Valle de México, INIFAP. 23 p.
- Wellhausen E J, L M Roberts, E Hernández X, en colaboración con P C Mangelsdorf (1951)** Razas de Maíz en México: Su Origen, Características y Distribución. Folleto Técnico No. 5, Oficina de Estudios Especiales, Secretaría de Agricultura y Ganadería, México, D. F. 237 p.