

Variabilidad genética, diversidad fenotípica e identificación de poblaciones sobresalientes de maíz cacahuacintle

Andrés González Huerta*, Delfina de Jesús Pérez López*, Aurelio Domínguez López*, Omar Franco Mora*, Artemio Balbuena Melgarejo*, Abel Ramos Malvárez* y Jaime Sahagún Castellanos**

Recepción: 13 de julio de 2007

Aceptación: 23 de abril de 2008

* Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México.

Correo electrónico: agh@uaemex.mx.

** Programa Universitario de Investigación y Servicio en Olericultura, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México.

Este estudio fue financiado por la Universidad Autónoma del Estado de México y el H. Ayuntamiento del Municipio de Calimaya de Díaz González. Agradecemos a los 34 agricultores de este municipio que donaron semilla y, especialmente, a Don Francisco Escamilla y Don Raymundo Arriaga, por permitirnos establecer los tres experimentos en terrenos de su propiedad. Al Ing. José Enrique Jaimes Arriaga, por su apoyo técnico en el registro de datos en campo y después de la cosecha del material genético; finalmente a los árbitros anónimos quienes contribuyeron a mejorar la presentación y el contenido del manuscrito original.

Resumen. En el año 2001 se hizo un estudio con el objetivo de estimar variabilidad genética, diversidad fenotípica e identificar poblaciones sobresalientes de Cacahuacintle. El material genético, consistente en 34 poblaciones, fue evaluado en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones por localidad. Los resultados indicaron lo siguiente: 1) Hubo poca variabilidad genética entre Cacahuacintles. 2) Hubo cuatro grupos de variables independientes: a) rendimiento de grano, diámetro de mazorca y alturas de planta y mazorca, b) longitud, peso de olote y de grano por mazorca, c) número de hileras de grano, y d) peso volumétrico del grano. 3) El análisis de conglomerados clasificó a los 34 Cacahuacintles en tres grupos; el grupo 3 estuvo integrado por las poblaciones con rendimientos entre 5.04 y 5.38 t ha⁻¹

Palabras clave: Zea mays, raza Cacahuacintle, variabilidad genética, diversidad fenotípica, análisis multivariado.

Genetic variability, phenotypic diversity and identification of outstanding populations of Cacahuacintle maize

Abstract. In 2001 a study aiming to determine the genetic variability, phenotypic diversity and identification of outstanding Cacahuacintle maize was performed. Genetic material from 34 populations was evaluated in a randomized complete block design, with three replicates per location. The results indicate that: 1) There was low genetic variability among Cacahuacintle populations, 2) There were four independent groups of variables: a) grain yield, ear diameter, and plant and ear height, b) ear length, cob and grain weight per ear, c) ear row number, and d) grain volumetric weight. 3) Cluster analysis classified the 34 Cacahuacintle populations into three groups; group 3 was formed by populations with grain yield from 5.04 to 5.38 t ha⁻¹.

Key words: Zea mays, Cacahuacintle race, genetic variability, phenotypic diversity, multivariate analysis.

Introducción

En el valle Toluca-Atlacomulco, localizado en el Estado de México, se siembran 250 000 ha de maíz (Niño *et al.*, 1998) y un 87% de los agricultores usan semilla

criolla (Herrera *et al.*, 2002) de las razas cónico, chalqueño, cacahuacintle y palomero toluqueño, descritas por Wellhausen *et al.* (1951). El 95% de esta superficie se siembra con criollos de cónico y chalqueño (Eagles y Lothrop, 1994), pero ambas razas se originaron de palomero

toluqueño y cacahuacintle, maíces reventador y harinoso, respectivamente.

La raza cacahuacintle se localiza principalmente en el valle de Toluca y, particularmente, en el Municipio de Calimaya de Díaz González, donde se comercializa principalmente como hortaliza (elote) y como grano despuntado, es decir, granos a los que se les ha eliminado mecánicamente el pedicelo y parte del embrión. Este tipo de maíz es muy importante para los agricultores del valle de Toluca, debido a que en éste se siembran 20 000 ha para la producción de elote y 10 500 ha para la producción de grano para pozole. El rendimiento en grano despuntado fluctúa entre 1.5 y 3.0 t ha⁻¹ y en la última década su precio varió desde \$2.0 a \$9.5 por kilogramo. Como hortaliza se producen entre 20 000 y 30 000 elotes de alta calidad por hectárea (González *et al.*, 1999; 2006); el rendimiento de grano sin despuntar varía de 3.2 a 6.5 t ha⁻¹ (Aguilar *et al.*, 1999; González *et al.*, 2006), pero experimentalmente se han obtenido hasta 10.0 t ha⁻¹ (Ramos y Gerón, 1998).

No obstante lo anterior, se desconocen las causas que han contribuido al incremento de su productividad y de su variabilidad genética y fenotípica, que permitan identificar poblaciones sobresalientes. No está bien documentado en la literatura especializada si la heterogeneidad ambiental, el aislamiento geográfico, la recombinación entre poblaciones de la misma o de diferentes localidades, o si la selección que los agricultores han realizado para rendimiento o usos culinarios específicos han contribuido a su conservación *in situ*, al incremento de su diversidad o a su mejoramiento genético. El manejo del cultivo por los agricultores quizás también ha incrementado la diversidad de variedades, que han mantenido su identidad y variabilidad genética en forma de criollos locales. Tampoco está bien documentado si la selección tradicional que ellos han practicado es la principal causa del incremento en el rendimiento y en la calidad del grano, o si al seleccionar visualmente por los atributos de la mazorca después de la cosecha, inconscientemente se han incrementado las alturas de planta y mazorca, el acame de tallo y raíz, la pudrición de mazorca y el número de plantas con esterilidad femenina, porque un incremento en éstas se encuentra asociado con una disminución en el potencial de rendimiento (Niño *et al.*, 1998; González *et al.*, 2006).

En maíz es conveniente valorar la variación existente entre poblaciones de una raza y clasificar la diversidad fenotípica y genética regional para hacer un uso sistemático de las poblaciones a través de delinear procedimientos eficientes para un mejor aprovechamiento de los recursos nativos. También es importante determinar si los caracteres morfológicos

propuestos como apropiados para valorar diversidad genética entre razas son adecuados también para estudiar la diversidad fenotípica entre cacahuacintles del Municipio de Calimaya, Estado de México.

Para saber si la selección rigurosa que el agricultor ha realizado para grano harinoso ha producido homogeneidad fenotípica en el rendimiento de grano y otras características de planta y mazorca, se efectuó este estudio con los objetivos principales de estimar variabilidad genética entre cacahuacintles del Municipio de Calimaya, determinar su diversidad fenotípica y sus interrelaciones con las variables evaluadas, que permitan identificar poblaciones sobresalientes a utilizar en programas de mejoramiento genético, generación de tecnología o producción de semilla.

1. Materiales y métodos

1.1. Descripción del área de estudio

El presente trabajo se desarrolló en condiciones de temporal en el año 2001 en San Diego La Huerta (SD), San Lorenzo Cuauhtenco (SL) y Santa María Nativitas (SM), localidades del Municipio de Calimaya de Díaz González, que en lo sucesivo será denominado Calimaya. Este municipio pertenece al valle de Toluca y se ubica a 17 km al sur de la capital del Estado de México, a 19°09'30" de latitud norte y 99°37'17" de longitud oeste del Meridiano de Greenwich. Los terrenos agrícolas del municipio tienen topografía muy variada y pueden tener pendientes mayores al 6%. Al oeste se localiza la parte más alta a 4 758 m, que baja hasta el terreno plano de la parte oriental, a una altitud de 2 600 m. Su clima predominante es templado subhúmedo con tendencia al frío, la temperatura media anual es de 12.8°C, la mínima es de -4.0°C y la máxima de 26°C. La precipitación media anual es de 800 a 900 mm. Predominan los suelos andosol, desde los arcillo-limosos hasta los franco-arenosos y arenosos, éstos son muy friables, derivados de cenizas volcánicas, con pH ácido (de 3.8 a 6.0) y descansan sobre un sustrato volcánico de pumicita suelta (tepojal), que se encuentra a profundidades de 40 a 100 cm (Ramos y Gerón, 1998; Tarango, 1997).

2. Material genético

Se consideraron 34 razas de maíz cacahuacintle colectadas en seis localidades: SD, SM, SL, Cabecera Municipal (CM), San Marcos de la Cruz (SMC), y La Concepción Coatipan (LC), del Municipio de Calimaya, Estado de México. A través del H. Ayuntamiento de este municipio se hizo la invitación a todos los agricultores para proporcionar semilla de sus criollos, pero sólo se incluyeron los que presentaron granos

en cantidad y calidad apropiadas antes del 31 de marzo de 2001. En el cuadro 1 se presenta información del material genético.

2.1. Diseño y tamaño de la parcela experimental

Los 34 cacahuacintles fueron evaluados en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones por localidad. La parcela experimental constó de cuatro surcos de 6.0 m de longitud, con una distancia entre hileras de 0.8 m; cada hilera constó de 11 matas separadas a 0.6 m y cada una de éstas tuvo tres plantas. Como unidad experimental útil (UEU) se consideró a los dos surcos centrales de cada parcela.

3. Manejo de los experimentos

En las tres localidades la labranza del suelo consistió en un barbecho, un paso de rastra y un surcado. La fertilización inorgánica se hizo con el tratamiento 165N-65P-30K en dos aplicaciones: la primera se efectuó al sembrar y consistió en depositar todo el fósforo y el potasio y la mitad del nitrógeno y antes de la segunda labor cultural se aplicó el resto del nitrógeno. Como fuente de macroelementos se empleó urea (46 % de N), 18N-46P-00K y cloruro de potasio (60% de K). La siembra fue manual y consistió en depositar en mata cinco semillas cada 0.6 m, posteriormente se aclaró a tres plantas, cuando las plántulas tenían entre 12 y 16 cm (62 500 plantas ha⁻¹). Se realizaron dos labores culturales para aporcar las plantas, incorporar el fertilizante al suelo y eliminar mecánicamente la maleza: esta última también se controló con 1.5 kg ha⁻¹ de atrazina y 1.5 L ha⁻¹ de 2,4 D-amina, mezclados en un volumen de 200 L ha⁻¹ de agua. La araña roja (*Olygonichus mexicanus*), una plaga muy común y dañina en la región, se controló químicamente con Nuvacrón, mezclado con Agropplus (estimulante vegetal), en dosis de 1.0 y 0.25 L ha⁻¹, respectivamente. La cosecha del material genético en cada unidad experimental útil se realizó en la segunda semana de enero de 2002.

3.1. Variables registradas

Se registraron el número de plantas en cada UEU, la altura de planta (AP: distancia medida en m desde la superficie del suelo hasta las lígulas de la hoja bandera), la altura de mazorca (AM: distancia medida en metros desde la superficie del suelo hasta el nudo de inserción de la mazorca superior), el número de mazorcas cosechadas en la UEU, el diámetro de mazorca (DM: de su parte media, en cm), la longitud de mazorca (LM: distancia medida en cm desde la base hasta la punta de la mazorca), el número de hileras de la mazorca (NHM), el peso de olote (POM: en g) y de grano por mazorca (PGM: en g), el peso volumétrico del grano (PVG: de un litro, medido en g L⁻¹) y el rendimiento de grano (RG: producción de grano en la UEU estandarizado al 14% de humedad, expresado en kg). Con RG se estimó el rendimiento de grano en toneladas por hectárea considerando las plantas

Cuadro 1. Relación de agricultores cooperantes, lugar de colecta, rendimiento de grano comercial y otra información de 34 cacahuacintles del valle de Toluca, México.

No.	Nombre del agricultor (Localidad)	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	Densidad de siembra (kg)	Fertilización química	Años de siembra
P1	Leobardo Jasso (CM)	5.0	38-42	165-69-30	25
P2	Alejandro Aguirre (CM)	3.5	45.0	69-69-00	15
P3	Andrés Góngora (CM)	4.5	45.0	220-92-30	6
P4	Margarita García (CM)	4.0	50.0	119-69-30	10
P5	Miguel Castaño (CM)	5.5	45.0	174-92-30	10
P6	Esteban Fajardo (CM)	4.5	40.0	128-92-30	10
P7	Sergio Aguilar (CM)	4.5	40.0	165-64-45	20
P8	José Mendoza (CM)	4.7	40.0	229-15-30	15
P9	Enrique Esteves (CM)	4.5	40.0	174- 92-30	15
P10	Ascensión Robles (CM)	6.5	40.0	162-161-38	15
P11	Gregorio Jasso (CM)	4.0	40.0	34- 34- 34	8
P12	Raúl Reyes (SMC)	4.5	40.0	183-115-30	11
P13	Juan Reyes (SMC)	4.5	40.0	183-115-30	10
P14	Tomás Reyes (SMC)	4.5	40.0	183-115-30	12
P15	Mateo Valdés (SMC)	5.0	50.0	192-138-00	3
P16	Pedro Carmona (SMC)	4.5	45.0	183-115-30	15
P17	Godoleva Carmona (SMC)	4.7	40.0	183-115-30	16
P18	Cruz Reyes (SMC)	4.4	40.0	183-115-30	15
P19	Filemón Carmona (SMC)	4.5	40.0	183-115-30	7
P20	Domingo Corona (SMC)	4.5	40.0	215-138-00	15
P21	Gerónimo Arellano (SD)	5.0	50.0	165- 69- 00	1
P22	Raymundo Arriaga (SD)	4.0	60.0	184- 00-00	2
P23	Cecilio Flores (LC)	3.2	40.0	74- 00-30	4
P24	Armando Colín (SL)	4.5	40.0	160-115-30	2
P25	Félix Ríos (CM)	4.0	35.0	184- 92- 60	4
P26	Federico Colín (SL)	4.0	35.0	215-138-30	7
P27	Juan C. Carmona (SL)	4.5	38-42	23- 92- 30	20
P28	Manuel Gómez (SL)	5.5	40.0	23- 92- 30	10
P29	Hector Gómez (SL)	4.5	35.0	46- 92- 30	2
P30	Tomás Aguilar (CM)	4.5	40.0	182- 86- 45	2
P31	Genaro Rosas (CM)	4.3	35.0	184- 46- 30	10
P32	Mario López (CM)	4.0	38.0	169-138-00	10
P33	Jesús López (CM)	4.5	35.0	184- 46- 30	3
P34	Froylan Muciño (SM)	5.0	40.0	184- 92- 60	8

CM = Cabecera Municipal de Calimaya de Díaz González; SMC = San Marcos de la Cruz; SD = San Diego La Huerta; LC = La Concepción Coatipan; SL = San Lorenzo Cuauhtenco; SM = Santa María Nativitas. Fuente: Aguilar et al. (1999).

faltantes en la UEU. La información para AP, AM, LM, DM, NHM, POM y PGM corresponden a 10 datos por UEU; para el resto de las variables se consideraron 66 plantas de la UEU.

3.2. Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos a análisis de varianza, de componentes de varianza y heredabilidad en sentido amplio (H²) y comparación de medias entre localidades y entre tratamientos (cacahuacintles) con la prueba de la diferencia mínima significativa (DMS, p=0.01), según los procedimientos descritos en Martínez (1988) y en Sahagún (1998). H², considerada como un estimador de variabilidad genética total entre cacahuacintles, se calculó con los de los cuadrados medios del análisis de varianza combinado, según la siguiente fórmula (Sahagún, 1998):

$$H^2 = 100 \sigma^2_G / [\sigma^2_G + (\sigma^2_{GA}/e) + (\sigma^2_E/re)]$$

Donde: σ^2_G , σ^2_{GA} , y σ^2_E son estimaciones de las varianzas genéticas, de la interacción cacahuacintle x localidad y del error experimental combinado; e y r son el número de localidades y de repeticiones por localidad, respectivamente.

Además, desde una perspectiva multivariada, se hizo un análisis de componentes principales con una rotación tipo Varimax en los componentes resultantes, y un análisis de conglomerados con base en las distancias euclidianas al cuadrado y definición de grupos a una distancia de 210, según el método del vecino más lejano aplicado a la matriz de datos compuesta por cada una de las poblaciones de cacahuacintle (hileras) y los promedios aritméticos a través de las localidades de las variables evaluadas (columnas). Ambas técnicas fueron descritas por Johnson y Wichern (1999) y González *et al.* (2006).

4. Resultados y discusión

4.1. Análisis de varianza y localidades de evaluación

A excepción del peso volumétrico del grano (PVG), en las demás variables se detectaron diferencias altamente significativas (p = 0.01) entre localidades (L). Los efectos entre tratamientos o cacahuacintles (C), y de la interacción C x L no fueron significativos (cuadro 2). Estos resultados indican que las localidades fueron heterogéneas, que los cacahuacintles fueron fenotípicamente homogéneos y que la respuesta de estos últimos a través de las localidades fue similar. En las tres localidades se registraron promedios aritméticos iguales estadísticamente en alturas de planta y mazorca, número de hileras de la mazorca y peso volumétrico del grano. En San Lorenzo se registraron las menores alturas de planta y mazorca (2.15 y 1.47 m, respectivamente), la mayor longitud (15.68 cm) y diámetro de mazorca (5.64 cm), el mayor peso de grano por mazorca (181.2 g) y la mayor producción de grano (5.11 t ha⁻¹; cuadro 3). La heterogeneidad entre localidades podría estar relacionada con diferencias en altitud, topografía y pH del suelo, principalmente. El terreno de Santa María es plano y está situado a una altitud de 2 600 m, mientras que los de San Lorenzo y San Diego se sitúan a una altitud mayor a los 2 700 m y presentan pendiente mayor al 5%. El terreno de Santa María es arenoso, con pH de 6.0, mientras que los de San Lorenzo y San Diego son franco-limosos, con pH inferior a 5.0. González *et al.* (2006) evaluaron 30 especies de cacahuacintle colectados en tres localidades del Municipio de Calimaya (San Diego, San Marcos y Cabecera Municipal) y detectaron diferencias altamente significativas (p = 0.01) entre localidades en todas las variables. Los cacahuacintles sólo se diferenciaron estadísticamente en alturas de planta

Cuadro 2. Valores de F del análisis de varianza combinando los datos de 34 cacahuacintles evaluados en tres localidades del Municipio de Calimaya de Díaz González,

Estado de México, 2001.

F. V	AP	AM	LM	DM	NHM	POM	PGM	PVG	RG
Localidades (L)	156.00**	83.00**	14.50**	79.10**	1.87	19.40**	122.30**	1.86	32.20**
Cacahuacintles (C)	1.40	0.60	0.73	0.59	0.83	0.78	0.64	1.02	1.40
Interacción C x L	0.88	0.69	1.06	0.78	1.39	0.68	0.69	0.95	0.81
Media	2.29	1.56	15.31	5.54	12.58	24.21	166.60	665.70	4.75
C. V. (%)	5.04	5.83	5.57	3.06	5.28	15.14	9.21	2.78	19.60

AP = altura de planta; AM = altura de mazorca; 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; RG = rendimiento de grano por parcela. **significativo al 1%.

Cuadro 3. Comparación de medias entre localidades con la prueba de la diferencia mínima significativa (DMS, p = 0.01).

Localidad	AP	AM	LM	DM	NHM	POM	PGM	PVG	RG
San Lorenzo	2.15	1.47	15.68	5.64	12.49	26.04	181.2	664.4	5.11
Santa María	2.29	1.62	15.11	5.37	12.60	23.52	148.2	664.0	4.15
San Diego	2.43	1.60	15.13	5.60	12.66	23.07	170.3	668.3	4.99
DMS	0.41	0.33	0.30	0.06	0.24	1.32	5.5	6.7	0.33

AP = altura de planta (m); AM = altura de mazorca (m); 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); RG = rendimiento de grano (t ha⁻¹), **significativo al 1%.

y mazorca, número de hileras de la mazorca y rendimiento por parcela. La interacción cacahuacintle \times localidad ($C \times L$) sólo fue significativa ($p = 0.05$) en el número de hileras de la mazorca.

La interacción $C \times L$ no significativa que se observó en el presente estudio indica que un genotipo siempre mantuvo sus diferencias en la magnitud de la respuesta en relación con otro genotipo a través de los ambientes de evaluación, por lo que fue más fácil identificar a la mejor localidad y a los genotipos que presentaron la mejor adaptación; además, los efectos originados por las localidades fueron independientes de los efectos ocasionados por los cacahuacintles, por lo que el genotipo más rendidor podría sembrarse en cualquier localidad de este municipio, debido a que el material genético está bien adaptado a esta región. Estos resultados también sugieren que la adaptación de los cacahuacintles podría estar relacionada con la estructura genética del maíz: cada semilla tiene un contenido genético particular, por lo que cada planta que se origina de éstas es un híbrido complejo con caracteres morfológicos distintos. Sin selección se mantiene la variación genética o una condición altamente heterocigota y heterogénea dentro de cada población de polinización libre, lo que contrarresta los efectos desfavorables que el ambiente causa en la expresión del genotipo, favoreciéndose una mejor adaptación. Sin embargo, es necesario conducir más ensayos en otros años para estimar con mayor precisión la interacción $C \times L$, ya que como Márquez (1974) y Sahagún (1998) lo señalaron, en un área compacta la interacción genotipo \times año es más importante que la interacción genotipo \times localidad.

4.2. Variabilidad genética entre cacahuacintles

Las estimaciones de heredabilidad en sentido amplio (H^2) variaron de -69.6 a 42.0% ; altura de mazorca, longitud, diámetro, número de hileras y peso de grano por mazorca tuvieron valores negativos (cuadro 4). Márquez (1974) propuso que los valores negativos de H^2 se consideraran como estimadores con varianza cero. Estas estimaciones negativas están relacionadas con la homogeneidad fenotípica aparente que presentaron los cacahuacintles del Municipio de Calimaya y sugieren que existe poca variabilidad genética dentro de la raza, la cual podría estar asociada a la forma como

el agricultor elige e intercambia semilla dentro o entre localidades de este municipio. En México no están bien documentadas las percepciones y los propósitos de los agricultores en la selección de semilla de sus criollos de maíz, así como los efectos que causan sus prácticas sobre su estructura genética. El cruzamiento natural y la introgresión podrían modificar las características morfológicas y las frecuencias alélicas de sus criollos (Louette y Smale, 1998), pero no introducir cambios en las prácticas de los agricultores y, por lo tanto, no ser aceptadas (Cleveland *et al.*, 1999). Los agricultores mexicanos seleccionan semilla de sus criollos considerando únicamente las características de la mazorca. Las eligen: pesadas, bien desarrolladas (largas) y que no presenten daños por plagas y enfermedades (Louette y Smale, 1998; Herrera *et al.*, 2002). En cacahuacintle se siguen prácticas similares, al considerar las características de la mazorca elegidas después de la cosecha, dirigida a la obtención de granos blancos, grandes y harinosos que le proporcionan ventajas en su comercialización como elote o como grano despuntado para su consumo en pozole (Wellhausen *et al.*, 1951; González *et al.*, 2006). Estas prácticas podrían conducir a homogeneidad fenotípica dentro de la raza en las características de la mazorca pero no en las características de la planta, debido a que los agricultores no realizan selección en campo.

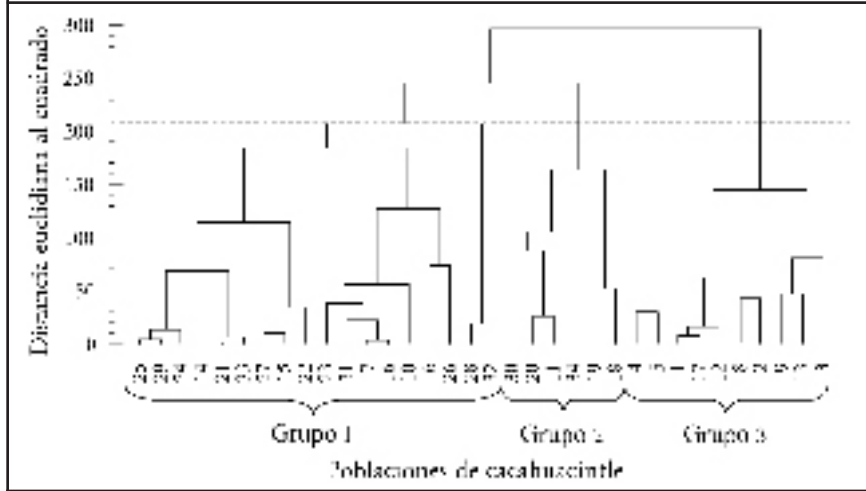
Reyes (1990) sugirió que los valores negativos de H^2 podrían estar relacionados con interacción genotipo \times ambiente significativo, problemas en el muestreo del número óptimo de plantas para estimar medias y varianzas, con la especie y con la variabilidad presente en ésta, con los métodos usados para su estimación y con las suposiciones empleadas en los diseños genéticos y experimentales. Las estimaciones negativas de H^2 que se observaron en el presente estudio podrían estar relacionadas con uniformidad fenotípica asociada a poca variabilidad genética dentro de la raza y con el método de estimación de los componentes de varianza y heredabilidad. La estimación de H^2 se hizo con el método de valores momentos, que aun cuando es insesgado, puede conducir a estimaciones de H^2 negativas, particularmente cuando la componente de varianza del error experimental es mayor que la de la varianza entre genotipos o de la interacción $G \times A$. Ramos y Gerón (1998) y González *et al.* (2006) también detectaron poca variabilidad genética dentro

Cuadro 4. Componentes de varianza y heredabilidad en sentido amplio (H^2) para rendimiento de grano y componentes del rendimiento de 34 cacahuacintles evaluados en tres localidades del Municipio de Calimaya de Díaz González, Estado de México.

Componente	AP	AM	LM	DM	NHM	POM	PGM	PVG	RG
G	7.83	-0.86	-0.026	-0.0006	-0.028	0.154	-1.28	2.73	57209
σ^2_{GA}	-5.40	-8.60	0.013	-0.0021	0.057	-1.420	-24.67	-5.42	-54345
σ^2_E	134.08	83.70	0.728	0.0287	0.443	13.450	235.55	344.26	872473
σ^2_P	20.92	5.57	0.059	0.0018	0.040	1.170	16.67	39.17	136035
H^2	37.40	-15.40	-43.750	-31.9300	-69.610	13.100	-7.67	6.96	42

AP = altura de planta; AM = altura de mazorca; LM = longitud de mazorca; DM = diámetro de mazorca; NHM = número de hileras de la mazorca; POM = peso de elote por mazorca; PGM = peso de grano por mazorca; PVG = peso volumétrico del grano; RG = rendimiento de grano por parcela. σ^2_G , σ^2_{GA} , σ^2_E y σ^2_P son las varianzas genética, de la interacción $G \times L$, del error combinado y fenotípica, respectivamente.

Figura 1. Agrupación de las 34 poblaciones de maíz cacahuacintle con base en la distancia euclidiana al cuadrado y las medias aritméticas de nueve variables, promediadas sobre repeticiones y localidades.



de la raza; además, González *et al.* (2006) concluyeron que AP, AM, DM, LM, NHM, POM, PGM, PVG y RG tuvieron valores de H^2 de 45.9, 40.8, -14.2, 15.9, 47.0, -20.5, -37.2, -19.0 y 50.2 %, respectivamente.

Cleveland *et al.* (1999) sugirieron que podría lograrse un mayor éxito en el mejoramiento vegetal si el fitomejorador se enfocara en dos aspectos: la selección entre genotipos, basada en el fenotipo, y la respuesta a la selección como una función de la variabilidad genética y de H^2 . Ellos propusieron incrementar H^2 empleando el diseño experimental apropiado para disminuir el error experimental y, por lo tanto, la diferencia entre la varianza genética y la varianza fenotípica y, cuando sea necesario, incrementar la varianza genética introduciendo germoplasma o técnicas de hibridación no disponibles a los agricultores. Wellhausen *et al.* (1951) comentaron que el cacahuacintle se encuentra limitado a altitudes entre 2 200 y 2 800 m en la Mesa Central de México, por lo que Toluca, San Andrés Ocotlán y San Mateo Atenco, en el Estado de México, Otlatlán, Teziutlan, Chapulco y San Miguel Totoltepec, en el Estado de Puebla, y Amaxac de Guerrero, en Tlaxcala, podrían considerarse como lugares apropiados para introducir germoplasma que permita ampliar la base genética de esta raza.

4.3. Análisis de conglomerados

El agrupamiento de las 34 poblaciones de cacahuacintle en función de las nueve variables evaluadas y las tres localidades consideradas, con una distancia euclidiana promedio de 210 y con datos estandarizados, dio origen a tres grupos (figura 1).

El grupo 1 estuvo constituido por las poblaciones identificadas como 6, 7, 10, 14, 15, 16, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 32 y 33. En éste se agruparon las poblaciones de mayor altura de planta (2.32 m), menor peso de olote por mazorca (23.79 g) y menor rendimiento de grano por hectárea (4.47 t ha⁻¹).

Los 18 cacahuacintles fueron colectados en Cabecera Municipal, San Lorenzo Cuauhtenco, San Diego La Huerta, La Concepción Coatipan y San Marcos de la Cruz (cuadros 1 y 5; figura 1).

En el grupo 2 se identificó a los cacahuacintles P11, P18, P19, P20, P30 y P34, que tuvieron los mayores pesos de olote (25.62 g) y de grano por mazorca (171.1 g) y rendimientos promedio de grano de 4.78 t ha⁻¹. Las seis poblaciones fueron colectadas en Santa María Nativitas, Cabecera Municipal y San Marcos de la Cruz (cuadros 1 y 5; figura 1).

El grupo 3 se formó con los cacahuacintles P1, P2, P3, P4, P5, P8, P9,

P12, P13 y P17, que presentaron los mayores rendimientos promedio de grano (5.20 t ha⁻¹), las menores alturas de planta (2.24 m) y mazorca (1.55 m), y el menor diámetro de mazorca (5.56 cm). Los 10 cacahuacintles fueron proporcionados por agricultores de Cabecera Municipal y San Marcos de la Cruz (cuadros 1 y 5; figura 1).

Al comparar los resultados anteriores con los de Wellhausen *et al.* (1951), se observó que la altura de los cacahuacintles se ha incrementado en 30 cm, el número de hileras de la mazorca se redujo en 2.62, el diámetro de mazorca se incrementó en 0.64 cm y el rendimiento de grano aumentó de 1.0 a 4.75 t ha⁻¹.

Los resultados observados en el presente estudio indican que el agrupamiento de los cacahuacintles sólo coincidió parcialmente con la localidad en la que éstas fueron colectadas, tal vez debido al intercambio de semilla que los agricultores de este municipio realizan a través de años y localidades (Aguilar *et al.*, 1999; González *et al.*, 2006). Como los cacahuacintles de la Cabecera Municipal y de San Marcos de la Cruz, en general, fueron los de mayor rendimiento de grano, se sugiere considerar a ambas localidades como sitios potenciales para la identificación de poblaciones sobresalientes o para el abastecimiento y producción de semilla.

4.4. Análisis genotipo × variable

En la representación gráfica de este análisis se puede observar que los componentes principales 1 (26.3%) y 2 (20.3%) explicaron 46.6% de la suma de cuadrados de la variación original. En relación con las variables, rendimiento de grano por hectárea (RGH) y diámetro de mazorca (DM) tuvieron interacción negativa con el componente 1, mientras que la de las alturas de planta (AP) y mazorca (AM) fue positiva. El componente

2 estuvo asociado principalmente con longitud de mazorca (LM) y pesos de grano (PGM) y de olote por mazorca (POM) y su correlación fue positiva. Como número de hileras por mazorca (NH) y peso volumétrico del grano (PVG) se ubicaron cerca del origen del biplot, se infiere que ambas variables se asociaron principalmente con los componentes principales 3 y 4; su contribución fue del 27.9% (figura 2).

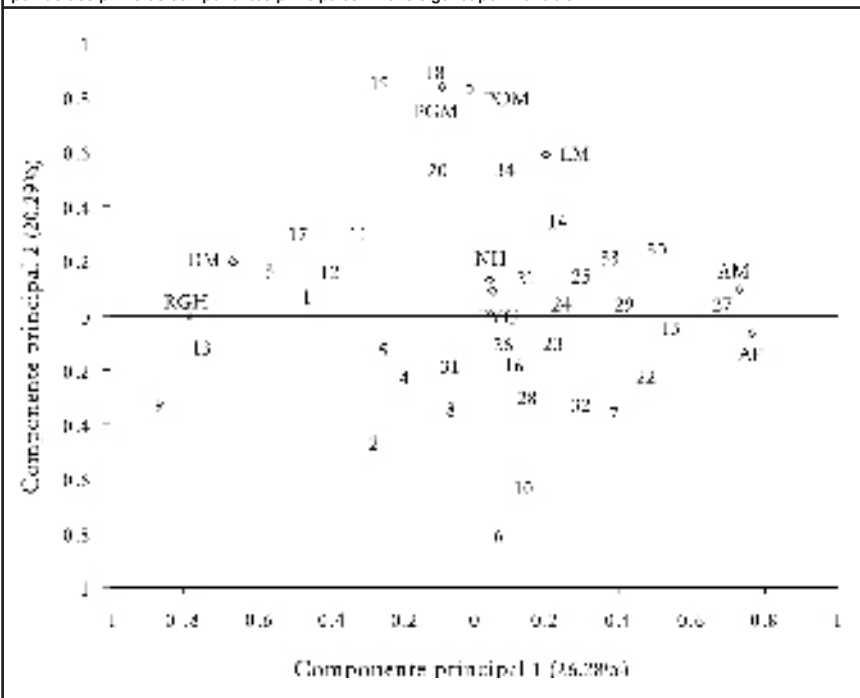
Al considerar a los 34 cacahuacintles, se observó que las alturas de planta variaron de 2.19 a 2.38 m, con una media de 2.29 m; las poblaciones 15 y 27, de mayor altura, sólo difirieron estadísticamente de P13, P17, P9 y P1, con medias de 2.23, 2.22, 2.22 y 2.19 m, respectivamente. Las alturas de mazorca variaron de 1.50 a 1.61 m, con una media de 1.56 m; las poblaciones 27, 33, 14 y 18 (1.61, 1.60, 1.59 y 1.59 m, respectivamente), con los mayores promedios, fueron estadísticamente iguales al resto de los cacahuacintles (cuadro 5). Al comparar los resultados del presente estudio con los de González *et al.* (2006), efectuado en el año 2001 en el Municipio de Calimaya, Estado de México, se detectó una disminución de 10 cm en altura de planta y un incremento de 20 cm en altura de mazorca. En siembra comercial es muy deseable emplear cacahuacintles de menor altura de planta y mazorca, como las poblaciones P1, P9, P13 y P17, debido a que serían menos susceptibles al acame y, al estar menos expuestas a la humedad del suelo, también podrían presentar pequeños porcentajes de pudrición de mazorca.

Las poblaciones 15, 14 y 18 (15.91, 15.90 y 15.87 cm) tuvieron la mayor longitud de mazorca y difirieron estadísticamente de P6, P26, P12, P24, P5, P13, P10, P9 y P8 (entre 14.07 y 14.82 cm); las primeras tres poblaciones podrían sembrarse para la producción de elote. Los 34 cacahuacintles tuvieron diámetros de mazorca iguales estadísticamente (entre 5.43 y 5.63 cm), con una media de 5.54 cm. P13, P12 y P9 fueron los más sobresalientes (5.63, 5.61 y 5.60 cm) y podrían recomendarse para la elaboración de pozole. La población 26 tuvo el mayor número de hileras de la mazorca (13.11) y superó estadísticamente a P22, P28 y P32 (12.28, 12.22 y 12.20 hileras); las tres poblaciones con el menor número de hileras de grano podrían emplearse para la elaboración de pozole, por su mayor tamaño de grano. P18 fue la población con el mayor peso de olote por mazorca (27.15 g) y

sólo superó estadísticamente a P10 y P32 (22.45 y 22.21 g). Debido a que el olote se emplea como material combustible, se sugiere emplear a P10 y P32, junto con otras poblaciones de menores pesos de olote, con este propósito, debido a que éstas producirían menores cantidades de humo durante la combustión.

P19 fue la población con el mayor peso de grano por planta (179.3 g), pero ésta sólo superó estadísticamente a P10, P5 y P6 (160.1, 159.6 y 157.9 g). En la población 34 se registró el mayor peso volumétrico de grano (678 g L⁻¹), pero su diferencia sólo fue significativa con respecto a P23, P32 y P28 (655, 655 y 651 g L⁻¹; cuadro 5). González *et al.* (2006) identificaron cacahuacintles con menor longitud de mazorca (15.31 *versus* 13.8 cm) y menores pesos de grano por mazorca (166.6 g *versus* 136.6 g) y volumétricos de grano (665 *versus* 606 g L⁻¹). Las variedades con mayor peso de grano por mazorca, en general, también son las de mayor producción de grano por hectárea, pero también podrían ser las de menor calidad de harina y, por lo tanto, de menor calidad pozolera. Así, se sugiere el empleo de las poblaciones P23, P28 y P32 para la elaboración de pozole. Las características como longitud, diámetro, número de hileras y peso de olote y grano por mazorca son muy importantes para incrementar el rendimiento por hectárea y para mejorar la calidad del grano. Para la producción de elote, el agricultor elige mazorcas sanas, largas y con hileras de grano bien definidas, mientras que

Figura 2. Dispersión de nueve variables (letras) y 34 poblaciones de maíz cacahuacintle en el plano determinado por las dos primeras componentes principales. Análisis genotipo x variable.



para elaborar pozole, considera mazorcas cortas, con mayor diámetro de mazorca y menor número de hileras de grano; en ambos casos deben elegirse mazorcas con granos grandes, harinosos y blancos.

En las poblaciones 2, 3 y 17 se registró la mayor producción de grano (5.4 t ha⁻¹). P2 superó estadísticamente a P24, P25 y P29 (4.3, 4.1 y 4.3 t ha⁻¹, respectivamente), pero P3 y P17 sólo difirieron estadísticamente de P25. La superioridad de P2 se atribuye a que sus promedios aritméticos en todas las variables evaluadas fueron iguales estadísticamente a los de la mejor población (cuadro 5). Los agricultores del Municipio de Calimaya han obtenido rendimientos de grano entre 3.2 y 6.5 t ha⁻¹ (Aguilar *et al.*, 1999), mientras que Ramos y Gerón (1998) concluyeron que en Santa María Nativitas y en Juchitepec, Estado de México, las mejores poblaciones produjeron 6.08 y 10.0 t ha⁻¹, respectivamente. González

et al. (2006) también identificaron 13 cacahuacintles con rendimientos iguales o mayores (entre 5.4 y 6.4 t ha⁻¹) que el de la mejor población.

Los resultados anteriores fueron confirmados parcialmente en las gráficas de los análisis genotipo × variable (figura 2) y de conglomerados (figura 1). Estos resultados muestran que la selección rigurosa que el agricultor ha realizado con base en las características de la mazorca ha incrementado el rendimiento y mejorado la calidad de grano, pero que inconscientemente las alturas de planta y mazorca se han dejado al azar, debido a que él no realiza selección de planta en campo. Con base en la comparación de medias de tratamientos y de ambos análisis multivariados, se sugiere que las poblaciones P1, P2, P3, P4, P5, P8, P9, P12, P13 y P17 sean empleadas en programas de mejoramiento genético, generación de tecnología o producción de semilla.

Cuadro 5. Comparación de medias de cacahuacintles con la prueba de la diferencia mínima significativa (DMS, p = 0.01).

Genotipo	AP	AM	LM	DM	NHM	POM	PGM	PVG	RG
P25	2.30	1.57	15.13	5.53	12.51	25.26	167.4	671	4.10
P29	2.35	1.58	15.23	5.53	12.57	24.00	169.4	671	4.28
P24	2.35	1.56	14.58	5.56	12.44	24.04	167.0	666	4.29
P14	2.29	1.59	15.90	5.55	12.75	25.03	167.6	667	4.42
P21	2.28	1.57	15.46	5.52	12.68	24.20	167.4	667	4.67
P33	2.29	1.60	15.72	5.50	12.62	24.32	169.3	661	4.48
P27	2.38	1.61	15.17	5.50	12.60	24.87	166.2	675	4.36
P15	2.38	1.58	15.91	5.51	12.66	25.02	163.8	667	4.63
P22	2.37	1.58	14.94	5.48	12.28	23.57	166.4	676	4.58
P23	2.34	1.54	15.59	5.52	12.64	23.83	166.9	655	4.33
P31	2.29	1.55	15.07	5.53	12.57	22.81	169.6	667	4.48
P7	2.33	1.58	15.45	5.52	12.51	23.08	164.5	666	4.53
P16	2.31	1.57	15.45	5.52	12.32	24.02	163.9	662	4.74
P10	2.36	1.57	14.25	5.56	12.64	22.45	160.1	661	4.76
P6	2.29	1.54	14.82	5.50	12.95	22.78	157.9	668	4.42
P26	2.31	1.56	14.80	5.57	13.11	23.16	168.2	665	4.45
P28	2.27	1.58	15.33	5.51	12.22	23.67	164.5	651	4.51
P32	2.28	1.58	15.54	5.45	12.20	22.21	164.7	655	4.59
Grupo 1	2.32	1.57	15.24	5.52	12.57	23.79	165.8	665	4.47
P30	2.30	1.56	15.59	5.43	12.44	24.48	167.3	667	4.40
P20	2.27	1.55	15.46	5.53	12.42	26.12	169.6	667	4.52
P11	2.27	1.53	15.10	5.54	12.40	25.05	165.3	663	5.20
P34	2.36	1.53	15.76	5.52	12.75	25.21	172.0	678	4.94
P19	2.26	1.55	15.32	5.56	12.71	25.75	179.3	663	4.78
P18	2.28	1.59	15.87	5.59	12.86	27.15	173.1	657	4.87
Grupo 2	2.29	1.55	15.51	5.52	12.59	25.62	171.1	665	4.78
P4	2.26	1.57	15.06	5.55	12.82	23.72	164.2	656	4.97
P5	2.25	1.58	14.27	5.57	12.55	25.45	159.6	663	5.09
P1	2.19	1.56	15.46	5.55	12.60	24.77	165.7	664	5.14
P17	2.22	1.56	15.23	5.57	12.68	23.97	170.2	668	5.30
P12	2.25	1.58	14.79	5.61	12.77	24.66	168.3	663	5.29
P8	2.29	1.56	14.07	5.49	12.57	23.35	162.1	664	5.24
P2	2.26	1.57	15.17	5.52	12.73	23.68	161.2	673	5.44
P9	2.22	1.50	14.23	5.60	12.35	23.96	165.7	663	5.04
P13	2.23	1.52	14.26	5.63	12.48	22.95	166.8	664	5.13
P3	2.28	1.54	14.88	5.59	12.48	24.42	170.6	675	5.38
Grupo 3	2.24	1.55	14.74	5.56	12.60	24.09	165.4	665	5.20
DMS	0.14	0.11	1.03	0.20	0.80	4.45	18.6	22	1.13

AP = altura de planta (m); AM = altura de mazorca (m); 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); RG = rendimiento de grano por hectárea (t ha⁻¹).

Conclusiones

La homogeneidad fenotípica que se detectó en los cacahuacintles del Municipio de Calimaya, Estado de México, cuando se consideró el rendimiento de grano, las alturas de planta y mazorca y las características de la mazorca, podría estar relacionada con poca variabilidad genética dentro de la raza; para ampliar su base genética se sugiere introducir germoplasma de otras regiones de este o de otros estados del país, con menores alturas de planta y mazorca. El análisis de componentes principales indicó que existen cuatro grupos de variables independientes:

a) rendimiento de grano, diámetro de mazorca y alturas de planta y mazorca.

b) longitud, peso de olote y de grano por mazorca.

c) número de hileras de la mazorca.

d) peso volumétrico del grano.

El análisis de los datos de los tres experimentos y la interacción C × L no significativa que se observó en el presente estudio permitió identificar como poblaciones sobresalientes a P2, P3 y P17 (5.4 t ha⁻¹), las cuales podrían emplearse en programas de mejoramiento genético, generación de tecnología o producción de semilla en el municipio de Calimaya. Los resultados indicaron que es posible la obtención de variedades de menores alturas de planta y mazorca, mayor diámetro de mazorca y mayor rendimiento de grano.

ergo

- Aguilar, M. L. B.; G. Calvo C.; F. I. Nájera.; R. Serrato; V. Landeros; D. J. Pérez; C. Esquivel A. y A. González (1999). "Agrodiversidad en la raza de maíz cacahuacintle en Calimaya, México", en Arriaga. C. (ed.). *Seminario Internacional sobre Agrodiversidad Campesina*. Centro de Investigación en Ciencias Agropecuarias. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Cleveland, D. D. A.; D. Soleri; y S. E. Smith (1999). *Farmer Plant Breeding from a Biological Perspective: Implications for Collaborative Plant Breeding*. CIMMYT Economics Working Paper 99-10, México, D. F.
- Eagles, H. A. y J. E. Lothrop (1994). "Highland maize from Central México. – Its Origin, Characteristics, and Use in Breeding Programs", *Crop Science*. 34(1), USA.
- González, H. A.; L. B. Aguilar; F. I. Nájera; G. Calvo; J. Sahagún; D. J. Pérez; V. Landeros; y R. Serrato (1999). "Problemática ambiental y análisis económico de la agricultura del Municipio de Calimaya de Díaz González, México", en *Memoria del Primer Seminario Internacional Tecnología-Industria-Territorio*. UAQ-IPN (Coord.) Querétaro, México.
- González H. A.; J. Sahagún; D. J. Pérez; A. Domínguez; R. Serrato; V. Landeros y E. Dorantes (2006). "Diversidad fenotípica del maíz cacahuacintle en el Valle de Toluca, México", *Revista Fitotecnia Mexicana*. 29(3) México.
- 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", *Fitotecnia Mexicana*. 25(1), México.
- Johnson, F. A. y D. W. Wichern (1999). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Pritince Hall. 4a. ed.
- Louette, D. y M. Smale (1998). "Farmers' Seed Selection Practices and Maize Variety Characteristics in a Traditionally-Based Mexican Community", *CIMMY Economics Working Paper*. Núm. 98-04, México.
- Márquez, S. F. (1974). *El problema de la interacción genotipo-ambiental en Genotecnia Vegetal*. Editorial Patena, Chapingo, Estado de México, México.
- Martínez G. A. (1988). *Diseños experimentales, métodos y elementos de teoría*. Trillas, México.
- Niño, C. V.; C. Nicolás; D. J. Pérez; y A. González (1998). "Estudio de trece híbridos y cinco variedades de maíz en tres localidades del valle Toluca-Atlacomulco", *Ciencias Agrícolas- Informa*. Ciencias Agrícola-Informa. Núm.12, México.
- Ramos, R. A. y F. Gerón. (1998). "Origen y distribución geográfica, diversidad y potencial productivo de la raza de maíz cacahuacintle", en UAEM (Coord.). *Seminario Mesoamericano sobre Agrodiversidad en la Agricultura Campesina*. UAEM. Toluca, México.
- Reyes, C. P. (1990). *El maíz y su cultivo*. AGT- Editor, S. A. México, D. F.
- Sahagún, C. J. (1998). "Evaluaciones genotípicas en serie de experimentos", *Germen*. Núm. 14, Sociedad Mexicana de Fitogenética.
- Tarango, M. V. M. (1997). *Plan de Desarrollo Municipal 1997-2000*. H. Ayuntamiento Constitucional de Calimaya de Díaz González, Gobierno del Estado de México.
- Vasal, S. K.; G. Srinivasan; N. Vergara; F. González (1995). "Heterosis y aptitud combinatoria en germoplasma de maíz de Valles Altos", *Revista Fitotecnia Mexicana*. Vol. 18, Núm. 18(2).
- Wellhausen, E. J.; L. M. Roberts; E. Hernández P. C. Mangelsdorf (1951). *Razas de maíz en México, su origen, características y distribución*. Oficina de Estudios Especiales. Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D.F. Folleto Técnico Núm 5, México, D.F.