

## EFECTO DEL NIVEL DE HUMEDAD Y NITRÓGENO EN EL SUELO EN EL COMPORTAMIENTO DE MAÍCES HÍBRIDOS Y CRIOLLOS DE LOS VALLES ALTOS DE MÉXICO<sup>1</sup>

Cornelius Kibet Serrem\*, Cándido López-Castañeda<sup>2/\*</sup>, Josué Kohashi-Shibata\*

**Palabras clave:** *Zea mays* L., híbridos modernos, híbridos antiguos, criollos, sequía, nitrógeno.

**Keywords:** *Zea mays* L., modern hybrids, old hybrids, landraces, drought, nitrogen.

Recibido: 26/06/08

Aceptado: 08/09/08

### RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue determinar si los híbridos de maíz (*Zea mays* L.) para secano, en la región de Valles Altos de México, producen mayor rendimiento de grano que los materiales criollos (CR) y si los híbridos modernos (HM) tienen mayor rendimiento de grano (RG) que los híbridos antiguos (HA) y los CR en sequía y con un nivel de N bajo. Se sembró 9 híbridos y 5 criollos en 4 ambientes en campo: riego (R) con la aplicación de agua de la siembra a la madurez; sequía (S) con la suspensión de agua desde los 40 días después de la siembra hasta la madurez; N alto (160 kg.ha<sup>-1</sup>); y N bajo (80 kg.ha<sup>-1</sup>). Los híbridos produjeron mayor rendimiento de grano (RG), biomasa aérea final (BM) e índice de cosecha (IC), y tuvieron mayor longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), hileras.mazorca<sup>-1</sup> (HMZ) y granos.hileras<sup>-1</sup> (GH) que los CR en promedio de todos los ambientes. Los HM produjeron mayor RG, BM e IC, y tuvieron mayor LM, DM, HMZ y GH que los HA y los CR. También, los HM presentaron un intervalo anthesis-floración femenina (A-FF) más corto y un intervalo floración femenina-madurez fisiológica más largo que los HA y CR. El RG fue significativa y positivamente asociado con BM, IC, LM, DM, HMZ, GH y FF-MF, y negativamente relacionado con el intervalo A-FF en todos los ambientes. La estrecha relación observada entre el rendimiento de grano y las otras características agronómicas determinadas

### ABSTRACT

**Effect of soil nitrogen and humidity on the behavior of corn hybrids and landraces from the High Valleys of Mexico.** The objective of the present study was to determine whether the hybrids (H) of corn (*Zea mays* L.) produce greater grain yield than the landraces (LR) and if the modern hybrids (MH) recommended for rain-fed conditions in the region of the High Valleys of Mexico have higher grain yield than the old hybrids (OH) and LR under drought and low N. Nine hybrids and 5 landraces were planted in field conditions under 4 different environments: irrigation (I) with watering from sowing to maturity; drought (D) withholding water application from 40 days after sowing to maturity; high N (160 kg.ha<sup>-1</sup>); and low N (80 kg.ha<sup>-1</sup>). Hybrids had greater grain yield (GY), final aerial biomass (BM), harvest index (HI), length (LC) and diameter of cob (DC), rows.ear<sup>-1</sup> (RE) and grains.row<sup>-1</sup> (GR) than the landraces averaged over all environments. MH produced higher GY, BM and HI and had greater LC, DC, RE and GR than OH and LR. Moreover, MH showed a shorter anthesis-silking interval (ASI) and a longer silking-physiological maturity interval (SPMI) than OH and LR. GY was positively and significantly associated with BM, HI, LC, DC, RE, GR and SPMI, and negatively related to ASI in all environments. The close relationship shown between grain yield and the other plant characteristics could help to establish

1 Trabajo de Investigación realizado por el primer autor para obtener el grado de Doctor en Ciencias.

2 Autor para correspondencia. Correo electrónico: clc@colpos.mx

\* Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados. km 36,5 Carretera México-Texcoco, Montecillo, Municipio de Texcoco, Estado de México. C.P. 56230.

en las plantas, podrían ser útiles para establecer criterios de selección, más eficaces para el mejoramiento del rendimiento de grano en maíz, en condiciones deficitarias de agua y N.

more efficient selection criteria to improve the grain yield of corn in water- and nitrogen-limited environments.

## INTRODUCCIÓN

En la región central de Iowa, EE. UU., el mejoramiento genético de los híbridos comerciales de maíz (*Zea mays* L.) en el lapso de 1930 a 1989, se tradujo en una ganancia promedio de 56 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> equivalente al 56% de la ganancia anual promedio de los rendimientos de maíz en ese estado (100 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>), durante el mismo periodo; los híbridos de las décadas más recientes tuvieron mayor rendimiento de grano que los de las décadas previas (Duvick 1992). En México no existen estudios que permitan establecer la tendencia en el mejoramiento del rendimiento de grano para los híbridos de riego o secano. Sin embargo, se supone que los híbridos obtenidos para áreas de secano tienen una buena respuesta en el rendimiento de grano en ambientes con deficiencias hídricas y de N.

En México, se siembran anualmente alrededor de 7,8 millones ha de maíz, de las cuales, 80% se cultivan en condiciones de secano, con un rendimiento promedio nacional de 2 t.ha<sup>-1</sup> de grano (SAGARPA 2007). Este bajo rendimiento, se debe principalmente a las deficiencias hídricas edáficas, las cuales ocurren durante el periodo de lluvias y con frecuencia coinciden con las etapas reproductivas de la planta, lo que disminuye el número, peso y calidad del grano (Reyes-Ramones et al. 2000). Las deficiencias hídricas, en el periodo cercano a la floración, pueden reducir en más de 50% el rendimiento de grano; cuando la planta se encuentra entre 2 y 7 días previos a la antesis, la sensibilidad a las deficiencias hídricas es mayor, porque se afecta la polinización y el número total de granos (Grant et al. 1989). El déficit de agua durante el llenado

del grano también reduce el rendimiento al disminuir el peso del grano (Westgate y Grant 1989, NeSmith y Ritchie 1992).

Por otra parte, las deficiencias de N en el suelo son frecuentes en todos los sistemas de producción de secano, y también disminuyen el rendimiento de grano y la producción de biomasa aérea. En maíz, un nivel bajo de N reduce la capacidad de crecimiento del grano durante su etapa de llenado (Bäzinger et al. 2000), el número de granos.hilera<sup>-1</sup> y el número de mazorcas.planta<sup>-1</sup> (Zea et al. 1991). El número de granos.hilera<sup>-1</sup>, hileras.mazorca<sup>-1</sup> y el tamaño del grano pueden incrementarse al aplicar N en la etapa inicial de crecimiento del grano (Novoa y Loomis 1981). Otros estudios han consignado que el número de granos.mazorca<sup>-1</sup> presenta mayor respuesta a la aplicación de N que el tamaño del grano (Muchow 1994).

El objetivo de presente trabajo fue estudiar el comportamiento de híbridos de maíz modernos (HM) y antiguos (HA) recomendados para siembra de secano, y variedades criollas (CR), con riego, sequía, y 2 dosis de N al suelo, para determinar si los híbridos producen mayor rendimiento de grano que los criollos y si los híbridos modernos producen mayor rendimiento de grano que los híbridos antiguos y criollos en condiciones de deficiencias hídricas y un nivel de N bajo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio experimental

El experimento se sembró el 11 de abril de 2002 en el Campo Agrícola Experimental del Colegio de Postgraduados en Montecillo, Edo.

de México (19° 21' N, 98° 55' O y 2250 msnm). El suelo del lote experimental fue de textura arcillosa y 15% de contenido hídrico con pH=8 (1:2 H<sub>2</sub>O), 4,2% de M.O. (Walkey-Black), 0,2% de N<sub>2</sub> (Kjeldahl, en el límite entre normal y N alto), (Cadahia 1998), 50 mg.kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Olsen) y 1 meq.l<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (NH<sub>4</sub>OAc pH=7) en promedio de sus profundidades de 0-20, 20-40, 40-60 y 60-90 cm.

### Material genético

Se utilizaron 9 híbridos de maíz producidos por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y 5 materiales criollos. El material genético del INIFAP representa a los híbridos comerciales más utilizados en condiciones de secano en la

región de los Valles Altos de México, desde los años 60's. Los híbridos liberados de 1961-1988 se clasificaron como híbridos antiguos y de 1989-2000 como híbridos modernos (Cuadro 1).

### Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con 3 repeticiones en un arreglo factorial que incluyó a los 14 genotipos, 2 tratamientos de humedad y 2 tratamientos de fertilización en el suelo, con los genotipos anidados dentro de los tratamientos: riego (R) con la aplicación periódica de agua por gravedad desde la siembra hasta la madurez, y sequía (S) con la suspensión de agua desde los 40 días después de la siembra (dds), fecha equivalente a 1 semana después de la iniciación floral promedio de todos

Cuadro 1. Material genético utilizado en el experimento.

| Variedad | Genealogía                                                                                           | Año de liberación | Clasificación |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------|
| H-28     | [Mich. 21 Comp-1-27-2 x Mich. 1 Comp. 1-7-2] x [(Mich. 21-26) x (Méx. 39 Comp-1 x Mich. 21-20) 29-2] | 1961              | Antiguo       |
| H-30     | (Mich. 21-181-14-1 x Mich. 21-183) x (Mich. 21-88-2-3 x Cr. 439) <sup>2</sup>                        | 1973              | Antiguo       |
| H-32     | (VS-102-81 x CV-368-40) x (CR-163-11 x CV-411-37) <sup>2</sup>                                       | 1973              | Antiguo       |
| H-33     | (Mich. 21-181-14-1 x Mich. 21-183) x (Mich. 21-Comp.1-7-2 x Mich. 21- Comp. 27-2) <sup>2</sup>       | 1982              | Antiguo       |
| H-34     | (Mich. 21-181-14-1 x Mich. 21-183) <sup>1</sup>                                                      | 1989              | Moderno       |
| H-40     | (Otra de V-21 x Otras del Rancho Obrajuelos Querétaro) <sup>1</sup>                                  | 1999              | Moderno       |
| H-42     | (L-1-27 x L-1-93) x (Méx. 39-26 x Méx. 39 Comp. 1) <sup>2</sup>                                      | 1999              | Moderno       |
| H-44     | Mestizos formados con líneas de primera autofecundación <sup>3</sup>                                 | 2000              | Moderno       |
| H-48     | (Urq 54 x Pue. 6-1) x (Mich. 21-20) <sup>4</sup>                                                     | 1999              | Moderno       |
| Col. 1   | Colección-1 Criollo de ocho carreras, grano blanco <sup>5</sup>                                      | 1999              | Criollo       |
| Col. 3   | Colección-3 Criollo cremoso, grano amarillo <sup>5</sup>                                             | 1999              | Criollo       |
| Col. 2   | Colección-2 Criollo pata de Gorrión, grano blanco <sup>5</sup>                                       | 1999              | Criollo       |
| Col. 5   | Colección-5 Criollo azul, grano azul <sup>5</sup>                                                    | 1999              | Criollo       |
| CP-586   | CP#586 <sup>5</sup>                                                                                  | 2000              | Criollo       |

1=Híbrido de cruza simple; 2=Híbrido de cruza doble, 3=Híbridos de cruza múltiples; 4=Híbrido de cruza de 3 líneas; 5=Germoplasma colectado en Cuahtémoc, Huamantla, Tlaxcala, por el Dr. Cándido López-Castañeda, Programa en Genética, Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México en 1999; 5=Material proporcionado por el Dr. José Molina Galán, Programa en Genética, Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México.

los genotipos hasta la madurez de la planta. También se utilizó 160 kg.ha<sup>-1</sup> de N (N alto, AN) y 80 kg.ha<sup>-1</sup> de N (N bajo, BN). En ambos casos el 50% del N fue aplicado en la siembra y el otro 50% 40 dds; todo el P (80 kg.ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y todo el potasio (40 kg.ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O) se aplicaron en la siembra. Los tratamientos de riego y sequía estuvieron separados por un espacio de 12 m, con un canal de 60 cm de profundidad en la parte central, para evitar el movimiento de agua entre tratamientos de humedad. La unidad experimental consistió de 4 surcos de 5 m de longitud, separados a 0,8 m. Se sembraron 3 semillas por golpe a 0,5 m entre plantas; se hizo un raleo, dejando 2 plantas por golpe 15 dds. El control de malezas de hoja angosta se realizó con Gesaprim® (2,0 l.ha<sup>-1</sup>).

### Variables

Se registró el número de días y se calcularon los grados día (GD, °Cd) a: 1) antesis (A), días desde la siembra hasta la fecha en que el 50% de las plantas mostraban espigas con anteras en dehiscencia; 2) floración femenina (FF), días desde la siembra hasta la fecha en que el 50% de las plantas presentaron inflorescencias femeninas con los estigmas expuestos; 3) madurez fisiológica (MF), días desde la siembra hasta la fecha en que los granos de la parte media de la mazorca presentaban la formación de la capa negra en el nucelo; 4) intervalo antesis-floración femenina (A-FF); y 5) intervalo floración femenina-madurez fisiológica (FF-MF). El número de grados día se calculó de acuerdo con Castañeda-Saucedo et al. (2004):

$$GD = \sum_{i=1}^n (T_{ai} - T_b)$$

donde, GD representa al número de grados día (°Cd);  $T_{ai}$  es la media de la temperatura máxima y mínima diarias del aire, y  $T_b$  es la temperatura base (7,5°C) para el crecimiento de maíz (García-Pacheco y López-Castañeda 2002).

Se determinó también la altura de planta (AP, cm) desde el ras del suelo hasta el nudo de inserción de la espiga, en 5 plantas; biomasa aérea final (BM, t.ha<sup>-1</sup>) en 10 plantas cosechadas en la etapa de madurez fisiológica en cada unidad experimental, que se secaron a una temperatura de 70°C durante 72 h en una estufa (modelo 303354, RIOSSA) con sistema de aire forzado; rendimiento de grano en base seca, al cosechar las plantas de los 2 surcos centrales de cada unidad experimental (RG, t.ha<sup>-1</sup>); índice de cosecha (IC=RG.BM<sup>-1</sup>); longitud de mazorca (LM, cm); diámetro de mazorca (DM, cm); número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> (NHM); número de granos.hilera<sup>-1</sup> (NGH); peso individual del grano [PIG=(peso de 200 granos.200<sup>-1</sup>), mg].

### Análisis estadístico

Los datos se analizaron con el programa SAS (2007) en forma individual para cada ambiente y en combinación, incluyendo todos los ambientes, para determinar la significancia de la interacción genotipo x ambiente. Se calculó la diferencia significativa honesta (DSH, p<0,05) para la comparación de medias.

### Datos meteorológicos

Los datos de temperatura máxima y mínima del aire, y la precipitación pluvial, durante el ciclo, se obtuvieron de la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados, ubicada a 200 m del sitio en el que se estableció el experimento (Figura 1). La lluvia registrada de la siembra a la cosecha fue de 394 mm, distribuidos irregularmente, ocasionando deficiencias hídricas en las etapas de antesis e inicio de la floración femenina (Figura 1). La variación de la temperatura fue muy amplia; la mínima varió de 7,4°C en abril a 12,9°C en junio y la máxima fluctuó de 30,6°C en mayo a 21,2°C en setiembre; la temperatura más baja (7,4°C) se presentó en las etapas de germinación y emergencia de las plántulas y fue similar a la temperatura base para el crecimiento de maíz (García-Pacheco y López-Castañeda 2002). Posteriormente, la temperatura máxima

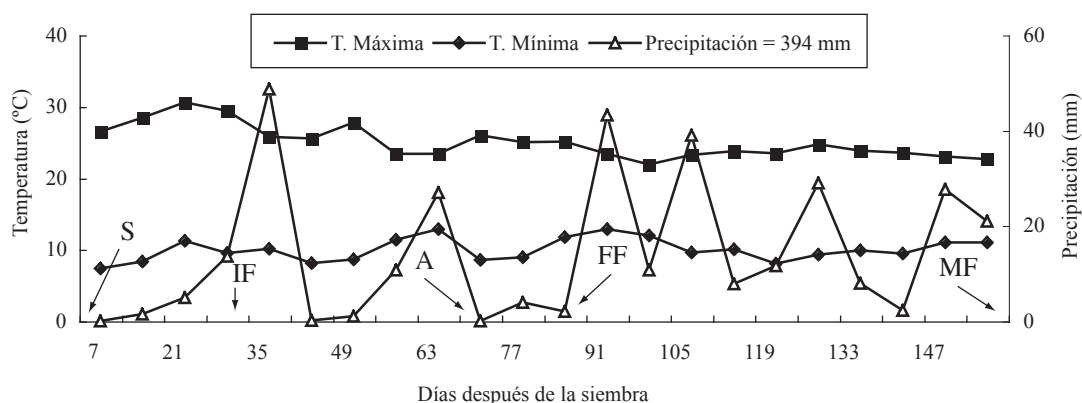


Fig. 1. Temperatura máxima y mínima media semanal, y precipitación semanal acumulada durante el ciclo de cultivo en riego y sequía. Montecillo, Edo. de México. 2002. S=Siembra; IF=Iniciación floral; A=Antesis; FF=Floración femenina; MF=Madurez fisiológica.

alcanzó valores superiores a 20°C durante la antesis, floración femenina y la formación de grano (Figura 1).

### Contenido hídrico del suelo

En el ambiente de riego, la humedad del suelo se mantuvo cercana a la capacidad de campo (CC) en las profundidades de 0-20, 20-40, 40-60 y 60-90 cm (datos no presentados), lo cual fue favorable para el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas. En el ambiente de sequía, la humedad en las profundidades de 0-20 y 20-40 cm, disminuyó por debajo del porcentaje de marchitamiento permanente (PMP) desde los 80 hasta los 109 dds (Figura 2a), y desde los 85 a los 102 dds (Figura 2b), respectivamente, y las plantas mostraron un alto grado de marchitamiento en las etapas de floración y llenado de grano. El contenido hídrico del suelo en las profundidades de 40-60 (Figura 2c) y 60-90 cm (Figura 2d) disminuyó desde los 50 a los 97 dds sin alcanzar el PMP.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis estadístico

El análisis combinado de los ambientes de humedad y N mostró que la variación genotípica

fue más alta para el rendimiento de grano, la biomasa aérea final, el número de granos.hiler<sup>-1</sup>, la altura de planta, la antesis, la floración femenina, la madurez fisiológica y los intervalos antesis-floración femenina y floración femenina-madurez fisiológica; la interacción genotipo x ambiente de humedad fue significativa para el rendimiento de grano, biomasa aérea final, antesis, floración femenina, madurez fisiológica y los intervalos antesis-floración femenina y floración femenina-madurez fisiológica. Mientras que la interacción genotipo x ambiente de N fue significativa sólo para la madurez fisiológica y los intervalos antesis-floración femenina, y floración femenina-madurez fisiológica (Cuadro 2). Otros estudios en maíz coinciden en señalar que el rendimiento de grano y el intervalo antesis-floración femenina fueron las características agronómicas más afectadas por la sequía y N bajo en poblaciones de grano blanco y amarillo tolerantes a sequía (Zaidi et al. 2004).

En el ambiente de riego, la variación genotípica fue alta para todas las características agronómicas determinadas en las plantas y la variación para la interacción N x variedad fue alta únicamente para el rendimiento de grano y los intervalos antesis-floración femenina y floración femenina-madurez fisiológica (Cuadro 2), características que reflejan el efecto combinado de los

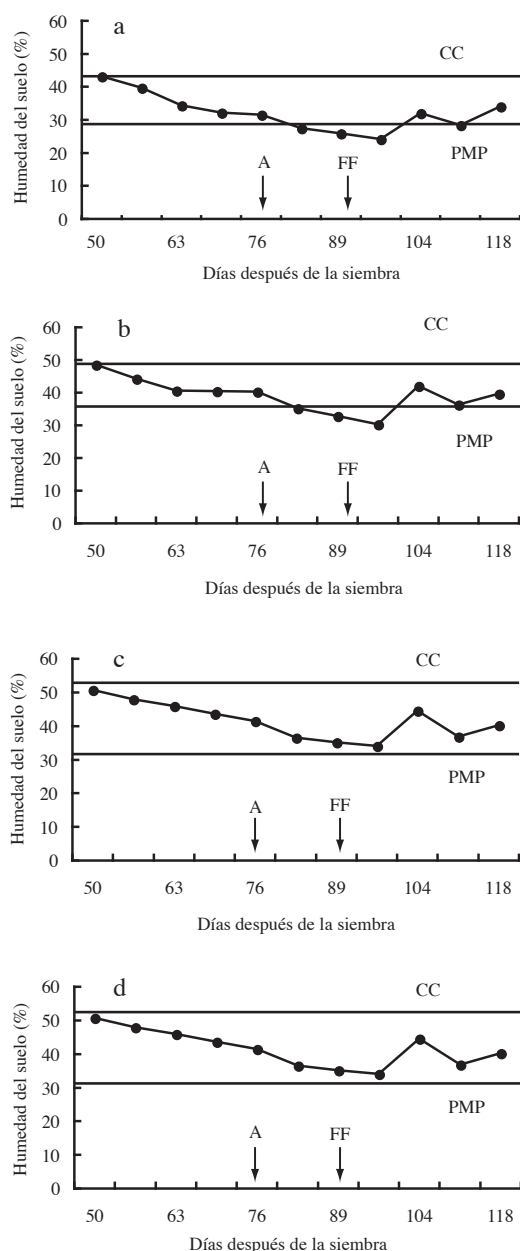


Fig. 2. Contenido de humedad edáfica en las profundidades de 0-20 cm (a), 20-40 cm (b), 40-60 cm (c) y 60-90 cm (d) en sequía. Montecillo, Edo. de México, 2002. CC=Capacidad de campo; PMP=Porcentaje de marchitamiento permanente; A=Antesis; FF=Floración femenina.

ambientes de humedad y N en el comportamiento de las plantas de maíz (Zaidi et al. 2004). La significancia de la interacción N x variedad para el rendimiento de grano, también puede estar relacionada con una mayor absorción de N y una mayor duración del periodo de llenado del grano en condiciones favorables de humedad (Tsai et al. 1984).

En el ambiente de sequía, la variación genotípica para la biomasa aérea final, el número de granos.hilera<sup>-1</sup>, altura de planta, antesis, floración femenina, madurez fisiológica y el intervalo floración femenina-madurez fisiológica, fue más alta que en el ambiente de riego con N alto y con N bajo. La interacción N x variedad sólo fue significativa para la madurez fisiológica y los intervalos antesis-floración femenina y floración femenina-madurez fisiológica (Cuadro 2); la menor significancia observada en las características de las plantas en el ambiente de sequía con N alto y con bajo, se debe a que el ambiente de estrés hídrico tuvo mayor efecto que el estrés causado por el ambiente de N bajo (Zaidi et al. 2004). La falta de significancia para la interacción N x variedad del rendimiento de grano en condiciones de sequía, puede estar determinada por las diferencias en madurez y duración del periodo de llenado del grano entre los híbridos y los criollos, una disminución en la tasa de síntesis de N, debido al estrés hídrico durante la formación del grano (Tsai et al. 1984), una reducción en la eficiencia en el uso del N (Carlone y Russell 1987) y porque los híbridos modernos tienen mayor rendimiento de grano que los híbridos antiguos también en condiciones favorables de humedad (Duvick 1984).

## Rendimiento de grano y sus componentes

### Híbridos vs criollos en sequía y N bajo

Los híbridos produjeron mayor rendimiento de grano, biomasa aérea final e índice de cosecha, y tuvieron mayor longitud y diámetro de mazorca, número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> y granos.hilera<sup>-1</sup> que los criollos en sequía y N bajo. Este mejor comportamiento de los híbridos también

Cuadro 2. Fuentes de variación (F.V.), cuadrados medios (C.M.), grados de libertad (G.L.) y coeficientes de variación (CV) para el rendimiento de grano (RG), biomasa aérea final (BM), índice de cosecha (IC), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), número de hilera-mazorca<sup>-1</sup> (NHM), número de granos-hilera<sup>-1</sup> (NGH), peso individual del grano (PIG), altura de planta (AP), días a antesis (A), días a floración femenina (FF), días a madurez fisiológica (MF), intervalo antesis-floración femenina (A-FF) e intervalo floración femenina-madurez fisiológica (FF-MF) de los análisis de varianza calculados en forma combinada de riego y sequía, e individual en riego y sequía, primavera-otoño 2002. Montecillo, Edo. de México.

| F.V.                              | G.L. | RG     | BM      | IC      | LM     | DM      | NHM    | NGH     | PIG      | AP        | A       | FF      | MF       | A-FF   | FF-MF    |
|-----------------------------------|------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|----------|-----------|---------|---------|----------|--------|----------|
| Análisis combinado riego y sequía |      |        |         |         |        |         |        |         |          |           |         |         |          |        |          |
| Humedad (H)                       | 1    | 57,5** | 257,0** | 0,024** | 11,5** | 1,8**   | 0,2ns  | 123,2** | 0,024**  | 10910,8** | 25,9**  | 203,7** | 1259,5** | 84,3** | 2476,3** |
| Nitrógeno (N)                     | 1    | 2,6ns  | 30,0*   | 0,008ns | 0,01ns | 0,07ns  | 0,03ns | 10,4ns  | 0,001ns  | 5228,8**  | 11,2**  | 2,6ns   | 133,9**  | 10,3*  | 174,1*   |
| H x N                             | 1    | 0,04ns | 0,1ns   | 0,005ns | 0,1ns  | 0,09ns  | 1,9ns  | 5,1ns   | 0,002ns  | 4928,8ns  | 11,9ns  | 4,3ns   | 9,5ns    | 12,1*  | 1941,0*  |
| Variedades (V)                    | 13   | 25,9** | 164,0** | 0,33**  | 15,9** | 1,5**   | 63,6** | 105,8** | 0,009**  | 2628,5**  | 270,1** | 310,1** | 2643,8** | 86,3** | 2129,4** |
| H x V                             | 13   | 11,7*  | 124,8** | 0,06ns  | 0,8ns  | 0,04ns  | 0,8ns  | 7,0ns   | 0,007ns  | 478,5ns   | 20,5**  | 39,3**  | 31,3**   | 12,6** | 83,8**   |
| N x V                             | 13   | 1,2ns  | 92,0ns  | 0,01ns  | 1,1ns  | 0,02ns  | 1,2ns  | 7,4ns   | 0,002ns  | 160,2ns   | 4,2ns   | 9,5ns   | 23,7**   | 13,2** | 52,9**   |
| Error                             | 125  | 0,8    | 4,6     | 0,009   | 1,0    | 0,05    | 1,4    | 6,0     | 0,01     | 309,5     | 20,4    | 31,3    | 43,7     | 8,2    | 72,3     |
| C.V. (%)                          |      | 2,6    | 16,9    | 0,1     | 6,9    | 4,3     | 7,2    | 9,3     | 8,8      | 7,7       | 2,7     | 3,1     | 2,7      | 1,4    | 9,0      |
| Riego                             |      |        |         |         |        |         |        |         |          |           |         |         |          |        |          |
| Nitrógeno (N)                     | 1    | 1,3ns  | 13,1ns  | 0,005ns | 0,07ns | 0,001ns | 1,2ns  | 0,5ns   | 0,0002ns | 125,5**   | 3,1ns   | 10,1ns  | 107,4*   | 14,3*  | 100,8*   |
| Variedades (V)                    | 13   | 15,8** | 59,4**  | 0,015** | 8,71** | 0,86**  | 35,8** | 51,1**  | 0,005**  | 177,0**   | 112,7** | 123,3** | 1302,4** | 31,9** | 1058,0** |
| N x V                             | 13   | 1,3*   | 4,5ns   | 0,01ns  | 0,89ns | 0,04ns  | 1,4ns  | 5,7ns   | 0,001ns  | 77,8ns    | 5,1ns   | 11,5ns  | 14,5ns   | 7,6*   | 340,7*   |
| Error                             | 56   | 0,6    | 5,1     | 0,01    | 0,73   | 0,04    | 1,3    | 4,3     | 0,001    | 154,9     | 4,8     | 21,1    | 28,0     | 7,0    | 42,4     |
| C.V. (%)                          |      | 6,1    | 1,6     | 2,6     | 5,8    | 4,0     | 6,9    | 7,7     | 8,2      | 4,9       | 2,2     | 3,0     | 3,1      | 1,7    | 9,2      |
| Sequía                            |      |        |         |         |        |         |        |         |          |           |         |         |          |        |          |
| Nitrógeno (N)                     | 1    | 1,3ns  | 16,8*   | 0,01ns  | 0,05ns | 0,2ns   | 0,7ns  | 15,0ns  | 0,01ns   | 4466,1**  | 1,5ns   | 6,9ns   | 36,0*    | 8,1**  | 74,3*    |
| Variedades (V)                    | 13   | 11,7** | 76,4**  | 0,01*   | 8,1**  | 0,7**   | 28,5** | 61,7**  | 0,04**   | 1355,9**  | 177,9** | 226,2** | 1372,7** | 67,1** | 1155,2*  |
| N x V                             | 13   | 1,2ns  | 5,5ns   | 0,01ns  | 0,9ns  | 0,04ns  | 1,3ns  | 5,3ns   | 0,02ns   | 213,6ns   | 4,2ns   | 7,6ns   | 23,8*    | 11,7** | 36,6*    |
| Error                             | 56   | 1,0    | 3,8     | 0,01    | 1,3    | 0,05    | 1,6    | 8,0     | 0,01     | 471,5     | 16,4    | 21,4    | 20,8     | 2,5    | 53,4     |
| C.V. (%)                          |      | 2,6    | 1,7     | 3,1     | 3,0    | 0,5     | 7,5    | 11,1    | 0,1      | 10,6      | 3,2     | 3,4     | 2,1      | 1,1    | 9,1      |

se observó en los otros ambientes; los híbridos produjeron mayor rendimiento de grano, biomasa aérea final e índice de cosecha, y tuvieron mayor longitud y diámetro de mazorca, número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> y granos.hilera<sup>-1</sup> que los criollos en sequía con N alto y riego con N bajo y con alto. Las variedades criollas presentaron mayor peso individual del grano que los híbridos en todos los ambientes. Los híbridos tuvieron menor altura de planta que los criollos en sequía con N bajo y mayor altura de planta que los criollos en riego con N alto y con bajo (Cuadro 3). La superioridad de los híbridos sobre los criollos o variedades de polinización abierta en el rendimiento de grano también se ha observado en otros estudios; los híbridos liberados en la década de los 80's en los EE. UU., tuvieron 62 y 70% más rendimiento de grano que las variedades de polinización abierta con una densidad de población óptima en ambien-

tes de alto y bajo rendimiento, respectivamente (Russell 1991). También, se ha determinado que el alto rendimiento de grano de los híbridos depende de una alta acumulación de biomasa antes de la floración femenina, mayor tamaño del área foliar que favorece una mayor intercepción de la radiación solar; una alta acumulación de materia seca durante el periodo de llenado del grano con una mayor duración del área foliar fotosintéticamente activa durante la formación del grano y una alta tasa de asignación de materia seca al grano o alto índice de cosecha (Tollenaar et al. 2004).

### *Híbridos modernos vs híbridos antiguos y criollos en sequía y N bajo*

Al comparar los híbridos modernos con los híbridos antiguos y los criollos se determinó

Cuadro 3. Rendimiento de grano (RG), biomasa aérea final (BM), índice de cosecha (IC), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> (NHM), número de granos.hilera<sup>-1</sup> (NGH), peso individual del grano (PIG) y altura de planta (AP), para los híbridos y los criollos en los ambientes de sequía y riego con N alto y bajo, primavera-otoño 2002. Montecillo, Edo. México.

| Variedades        | RG<br>(t.ha <sup>-1</sup> ) | BM   | IC   | LM<br>(cm) | DM  | NHM  | NGH | PIG<br>(mg) | AP<br>(cm) |
|-------------------|-----------------------------|------|------|------------|-----|------|-----|-------------|------------|
| Sequía con N bajo |                             |      |      |            |     |      |     |             |            |
| Híbridos          | 4,1                         | 12,0 | 0,34 | 14,4       | 4,9 | 17,8 | 26  | 363         | 208        |
| Criollos          | 2,4                         | 9,2  | 0,29 | 13,6       | 4,6 | 14,4 | 23  | 374         | 216        |
| DSH (p<0,05)      | 0,2                         | 0,3  | 0,02 | 0,2        | 0,1 | 0,2  | 1   | 6           | 4          |
| Sequía con N alto |                             |      |      |            |     |      |     |             |            |
| Híbridos          | 4,4                         | 13,1 | 0,35 | 14,3       | 4,9 | 18,3 | 27  | 358         | 197        |
| Criollos          | 2,5                         | 9,4  | 0,31 | 13,6       | 4,5 | 13,9 | 23  | 378         | 197        |
| DSH (p<0,05)      | 0,2                         | 0,5  | 0,02 | 0,2        | 0,1 | 0,2  | 1   | 6           | 4          |
| Riego con N bajo  |                             |      |      |            |     |      |     |             |            |
| Híbridos          | 5,5                         | 14,9 | 0,38 | 15,1       | 5,1 | 18,3 | 28  | 382         | 265        |
| Criollos          | 3,2                         | 10,9 | 0,30 | 13,8       | 4,7 | 14,0 | 26  | 402         | 247        |
| DSH (p<0,05)      | 0,1                         | 0,4  | 0,02 | 0,2        | 0,1 | 0,2  | 1   | 6           | 2          |
| Riego con N alto  |                             |      |      |            |     |      |     |             |            |
| Híbridos          | 5,7                         | 15,9 | 0,37 | 15,2       | 5,2 | 18,0 | 28  | 374         | 257        |
| Criollos          | 3,5                         | 11,4 | 0,31 | 13,8       | 4,7 | 13,9 | 22  | 405         | 241        |
| DSH (p<0,05)      | 0,1                         | 0,4  | 0,02 | 0,2        | 0,1 | 0,2  | 1   | 6           | 2          |

que los híbridos modernos produjeron mayor rendimiento de grano y biomasa aérea final, y tuvieron mayor longitud de mazorca, número de granos.hilera<sup>-1</sup> y peso individual de grano que los híbridos antiguos, y mayor rendimiento de grano, biomasa aérea final, índice de cosecha, longitud y diámetro de mazorca, número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> y granos.hilera<sup>-1</sup> que los criollos en sequía con N bajo y los demás ambientes. Los híbridos antiguos tuvieron mayor rendimiento de grano, biomasa aérea final, índice de cosecha, diámetro de mazorca, número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> y granos.hilera<sup>-1</sup> que los criollos. Los criollos tuvieron mayor peso individual de grano que los híbridos antiguos (Cuadro 4). El mayor rendimiento de

grano de los híbridos modernos también se ha observado en Argentina; los híbridos modernos tuvieron mayor estabilidad en el rendimiento de grano e índice de cosecha que los híbridos antiguos, al producir mayor número de granos por unidad de la tasa de crecimiento de la planta durante el periodo inmediato posterior a la floración femenina, que se reflejó en un incremento en la asignación de materia seca a la mazorca durante el periodo crítico de crecimiento del grano después de la emergencia de los estigmas (Echarte et al. 2004).

La variación genética observada en el rendimiento de grano entre híbridos modernos y antiguos, y criollos estuvo asociada con la

Cuadro 4. Rendimiento de grano (RG), biomasa aérea final (BM), índice de cosecha (IC), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> (NHM), número de granos.hilera<sup>-1</sup> (NGH), peso individual del grano (PIG) y altura de planta (AP), para los híbridos modernos y antiguos, y los criollos en los ambientes de sequía y riego con N alto y bajo, primavera-otoño 2002. Montecillo, Edo. México.

| Variedades        | RG<br>(t.ha <sup>-1</sup> ) | BM   | IC   | LM   | DM<br>(cm) | NHM  | NGH | PIG<br>(mg) | AP<br>(cm) |
|-------------------|-----------------------------|------|------|------|------------|------|-----|-------------|------------|
| Sequía con N bajo |                             |      |      |      |            |      |     |             |            |
| Híbridos modernos | 4,7                         | 13,5 | 0,35 | 14,7 | 5,0        | 17,3 | 27  | 375         | 210        |
| Híbridos antiguos | 3,5                         | 10,1 | 0,34 | 14,1 | 4,9        | 18,4 | 25  | 350         | 206        |
| Criollos          | 2,4                         | 9,2  | 0,29 | 13,6 | 4,6        | 14,4 | 23  | 374         | 216        |
| DSH (p<0,05)      | 0,4                         | 0,8  | 0,04 | 0,5  | 0,1        | 0,5  | 1   | 14          | 10         |
| Sequía con N alto |                             |      |      |      |            |      |     |             |            |
| Híbridos modernos | 5,2                         | 14,6 | 0,38 | 14,7 | 5,0        | 17,7 | 28  | 361         | 193        |
| Híbridos antiguos | 3,6                         | 11,7 | 0,31 | 13,9 | 4,8        | 18,9 | 27  | 355         | 201        |
| Criollos          | 2,5                         | 9,4  | 0,31 | 13,6 | 4,5        | 13,9 | 23  | 378         | 197        |
| DSH (p<0,05)      | 0,4                         | 1,2  | 0,04 | 0,5  | 0,1        | 0,6  | 1   | 15          | 10         |
| Riego con N bajo  |                             |      |      |      |            |      |     |             |            |
| Híbridos modernos | 6,2                         | 15,6 | 0,41 | 15,2 | 5,2        | 17,7 | 28  | 386         | 263        |
| Híbridos antiguos | 4,7                         | 14,1 | 0,34 | 14,9 | 5,1        | 18,9 | 28  | 378         | 267        |
| Criollos          | 3,2                         | 10,9 | 0,30 | 13,8 | 4,7        | 14,0 | 26  | 402         | 247        |
| DSH (p<0,05)      | 0,3                         | 1,0  | 0,04 | 0,4  | 0,1        | 0,5  | 1   | 14          | 5          |
| Riego con N alto  |                             |      |      |      |            |      |     |             |            |
| Híbridos modernos | 6,5                         | 17,0 | 0,40 | 15,4 | 5,2        | 17,3 | 29  | 383         | 253        |
| Híbridos antiguos | 4,8                         | 14,7 | 0,33 | 14,9 | 5,2        | 18,7 | 28  | 365         | 261        |
| Criollos          | 3,5                         | 11,4 | 0,31 | 13,8 | 4,7        | 13,9 | 22  | 405         | 241        |
| DSH (p<0,05)      | 0,3                         | 1,0  | 0,04 | 0,4  | 0,1        | 0,5  | 1   | 14          | 5          |

variación en otras características de la planta; el rendimiento de grano (RG) estuvo relacionado positiva y significativamente con la biomasa aérea final (RG=BM (0,43)-1,1,  $r=0,94$ ,  $p<0,01$ ) (Figura 3a); índice de cosecha (RG=IC (26,4)-

4,5,  $r=0,76$ ,  $p<0,01$ ) (Figura 3b); longitud de mazorca (RG=LM (0,36)-1-6,  $r=0,76$ ,  $p<0,01$ ) (Figura 3c); diámetro de mazorca (RG=DM (2,9)-10,  $r=0,70$ ,  $p<0,01$ ) (Figura 3d); número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> (RG=NHM (0,36)-1,6,  $r=0,56$ ,

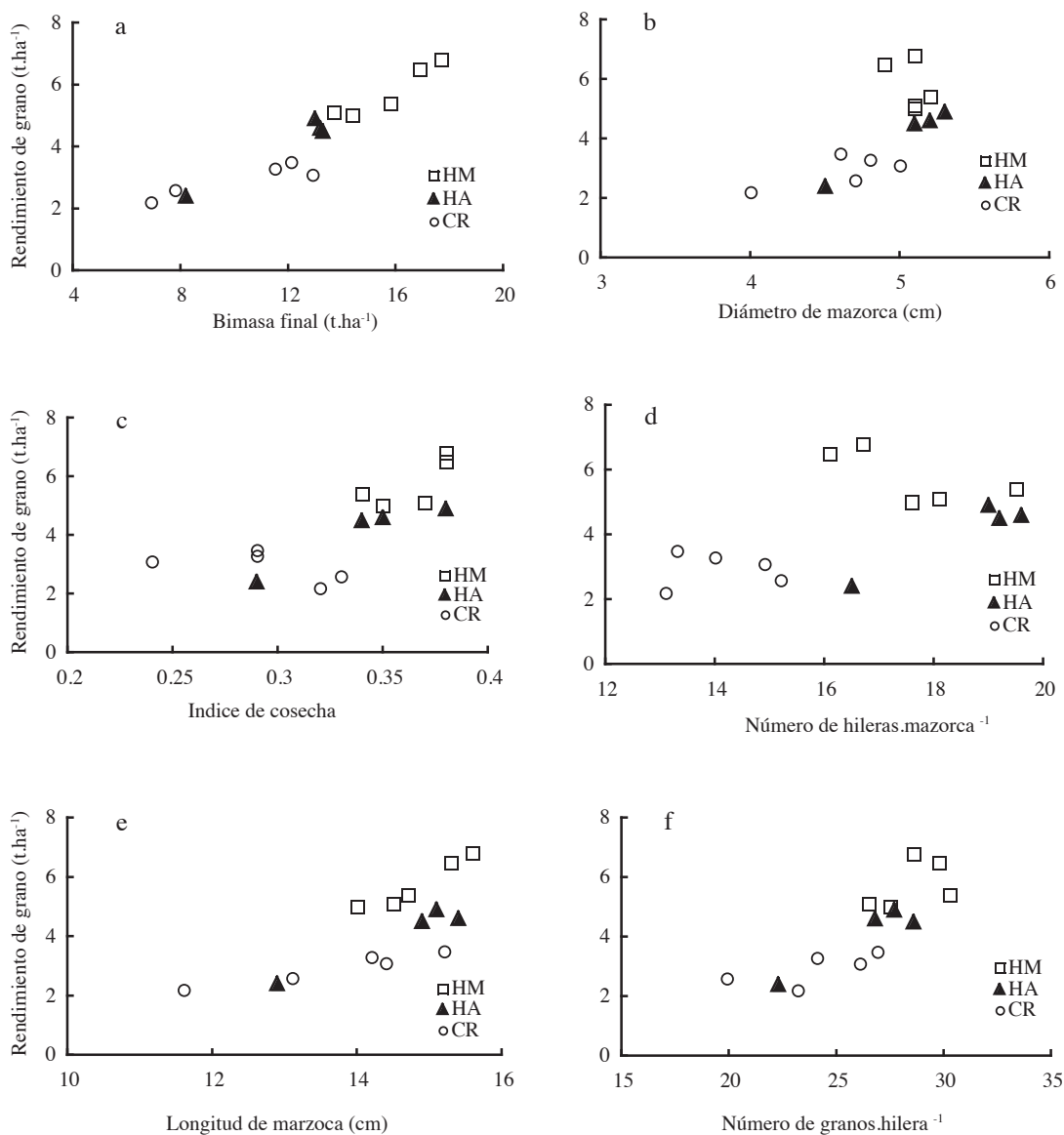


Fig. 3. Relación entre el rendimiento de grano y la biomasa aérea final (a), índice de cosecha (b), longitud de mazorca (c), diámetro de mazorca (d), número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> (e) y el número de granos.hileras<sup>-1</sup> (f) en promedio de los híbridos modernos y antiguos y las variedades criollas en riego, sequía y N alto y bajo. Montecillo, Edo. de México. 2002.

$p < 0,05$ ) (Figura 3e) y número de granos.hilera<sup>-1</sup> (RG=NGH (0,41)-6,6,  $r=0,84$ ,  $p < 0,01$ ) (Figura 3f); los híbridos modernos tuvieron biomasa, índice de cosecha, longitud y diámetro de mazorca, y número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> y granos.hilera<sup>-1</sup> más altos que los híbridos antiguos y los criollos. Otros estudios realizados en híbridos de maíz y sus líneas progenitoras en condiciones de campo en Canadá, indican que la tasa de intercambio de CO<sub>2</sub> del área foliar en los híbridos, empezó a ser más alta que en los progenitores 2 semanas después de la floración femenina y aumentó conforme las plantas se acercaron a la madurez. También una alta tasa de intercambio de CO<sub>2</sub> durante el ciclo de las plantas fue positiva y significativamente relacionada con la acumulación de biomasa aérea y el rendimiento de grano (Ahmadzadeh et al. 2004). La estrecha relación observada entre el rendimiento de grano y la biomasa aérea, indica que los híbridos modernos tuvieron mayor disponibilidad de asimilados para la formación de mazorcas de mayor longitud y diámetro que produjeron mayor número de hileras y granos.hilera<sup>-1</sup> que los híbridos antiguos, características que contribuyeron a un alto índice de cosecha y finalmente un alto rendimiento de grano.

#### ***Genotipos modernos vs genotipos antiguos y criollos en sequía y N bajo***

Los genotipos modernos H-40 y H-48 produjeron el rendimiento más alto de grano y también presentaron promedios altos de biomasa aérea final, índice de cosecha, longitud y diámetro de mazorca, hileras.mazorca<sup>-1</sup>, peso individual de grano y altura de planta en promedio de todos los ambientes. Los genotipos antiguos H-33, H-28 y H-30 produjeron mayor rendimiento de grano que el H-32 y tuvieron promedios altos de índice de cosecha, longitud y diámetro de mazorca, hileras.mazorca<sup>-1</sup>, granos.hilera<sup>-1</sup> y altura de planta. Los criollos Col. 1, Col. 3, Col. 2 y Col. 5 produjeron mayor rendimiento de grano que el criollo CP#586 y mostraron promedios altos de biomasa aérea final, longitud de mazorca, peso individual del grano y altura de planta (Cuadro 5). La variabilidad genética en el rendimiento

de grano y las otras características agronómicas observadas entre genotipos modernos, antiguos y criollos también se han registrado en otros trabajos de investigación; los híbridos antiguos y modernos produjeron mayor rendimiento de grano, biomasa aérea final, índice de cosecha y peso de 300 granos que los criollos en estudios realizados en 2 años, 4 localidades y 3 diferentes densidades de siembra en Iowa, EE. UU.; también se determinó que las características de planta que tuvieron mayor correlación positiva y significativa con el rendimiento de grano fueron la biomasa aérea final y el índice de cosecha (Russell 1991).

#### **Antesis, floración femenina y madurez fisiológica**

##### ***Híbridos vs criollos en sequía y N bajo***

El comportamiento de los híbridos y los criollos en el número de días y grados día a antesis, floración femenina, madurez fisiológica e intervalos antesis-floración femenina y floración femenina-madurez fisiológica fue muy similar entre ambientes; los híbridos tuvieron mayor número de días y grados día a antesis y madurez fisiológica que los criollos; el intervalo antesis-floración femenina fue más corto en los híbridos que en los criollos y el intervalo floración femenina-madurez fisiológica fue más largo en los híbridos que en los criollos, debido principalmente a un mayor número de días a la madurez fisiológica (Cuadro 6). Diversos trabajos de investigación señalan que un intervalo antesis-floración femenina corto en condiciones de estrés hídrico, favorece una mayor polinización y establecimiento del número de granos; una mayor sincronía entre antesis y floración femenina, y un mayor número de granos por planta, lo cual tiene una fuerte influencia en el rendimiento de grano (Bolaños y Edmeades 1996).

Por otra parte, se ha demostrado que el estrés hídrico durante la floración reduce el crecimiento de la inflorescencia femenina y consecuentemente retrasa la emergencia de los estigmas, resultando en un intervalo antesis-floración femenina más largo (Russell 1991); sí

Cuadro 5. Rendimiento de grano (RG), biomasa aérea final (BM), índice de cosecha (IC), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> (NHM), número de granos.hilera<sup>-1</sup> (NGH), peso individual del grano (PIG) y altura de planta (AP), para los híbridos modernos y antiguos, y los criollos en promedio de riego, sequía, N alto y bajo, primavera-otoño 2002. Montecillo, Edo. México.

| Variedades        | RG<br>(t.ha <sup>-1</sup> ) | BM   | IC   | LM<br>(cm) | DM  | NHM  | NGH  | PIG<br>(mg) | AP<br>(cm) |
|-------------------|-----------------------------|------|------|------------|-----|------|------|-------------|------------|
| Híbridos modernos |                             |      |      |            |     |      |      |             |            |
| H-40              | 6,8                         | 17,7 | 0,38 | 15,6       | 5,1 | 16,7 | 28,6 | 369         | 220        |
| H-48              | 6,5                         | 16,9 | 0,38 | 15,3       | 4,9 | 16,1 | 29,8 | 389         | 224        |
| H-34              | 5,4                         | 15,8 | 0,34 | 14,7       | 5,2 | 19,5 | 30,3 | 369         | 245        |
| H-44              | 5,1                         | 13,7 | 0,37 | 14,5       | 5,1 | 18,1 | 26,5 | 395         | 220        |
| H-42              | 5,0                         | 14,4 | 0,35 | 14,0       | 5,1 | 17,6 | 27,5 | 360         | 237        |
| Híbridos antiguos |                             |      |      |            |     |      |      |             |            |
| H-33              | 4,9                         | 13,0 | 0,38 | 15,1       | 5,3 | 19,0 | 27,7 | 368         | 205        |
| H-28              | 4,6                         | 13,2 | 0,35 | 15,4       | 5,2 | 19,6 | 26,8 | 365         | 237        |
| H-30              | 4,5                         | 13,3 | 0,34 | 14,9       | 5,1 | 19,2 | 28,6 | 359         | 239        |
| H-32              | 2,4                         | 8,2  | 0,29 | 12,9       | 4,5 | 16,5 | 22,3 | 335         | 213        |
| Criollos          |                             |      |      |            |     |      |      |             |            |
| Col. 1            | 3,5                         | 12,1 | 0,29 | 15,2       | 4,6 | 13,3 | 26,9 | 413         | 237        |
| Col. 3            | 3,3                         | 11,5 | 0,29 | 14,2       | 4,8 | 14,0 | 24,1 | 414         | 236        |
| Col. 2            | 3,1                         | 12,9 | 0,24 | 14,4       | 5,0 | 14,9 | 26,1 | 415         | 244        |
| Col. 5            | 2,6                         | 7,8  | 0,33 | 13,1       | 4,7 | 15,2 | 19,9 | 378         | 205        |
| CP#586            | 2,2                         | 6,9  | 0,32 | 11,6       | 4,0 | 13,1 | 23,2 | 330         | 205        |
| Media general     | 4,3                         | 12,6 | 0,33 | 14,4       | 4,9 | 16,8 | 26,3 | 374         | 226        |
| DSH (p<0,05)      | 1,2                         | 3,0  | 0,13 | 1,4        | 0,4 | 1,7  | 3,4  | 46          | 25         |

las plantas desarrollan la habilidad de utilizar la humedad del suelo eficientemente, manteniendo la turgencia en condiciones de sequía, esto puede ayudar a estabilizar el flujo de asimilados para la determinación del número de granos y el llenado del grano (Campos et al. 2004).

#### ***Híbridos modernos vs híbridos antiguos y criollos en sequía y N bajo***

Los híbridos modernos tuvieron menor número de días a antesis y floración femenina, y un intervalo antesis-floración femenina más corto que los híbridos antiguos, y requirieron mayor número de días para la madurez fisiológica y el intervalo floración femenina-madurez fisiológica

que los híbridos antiguos en sequía y N bajo. Los híbridos modernos mostraron mayor número de días a antesis y madurez fisiológica, y un intervalo floración femenina-madurez fisiológica más largo que los criollos; el intervalo antesis-floración femenina fue más corto en los híbridos que en los criollos. Los híbridos antiguos tuvieron mayor número de días y grados día a antesis y madurez fisiológica que los criollos y tuvieron un intervalo floración femenina-madurez fisiológica más corto que los criollos; el intervalo antesis-floración femenina fue más corto en los híbridos antiguos que en los criollos (Cuadro 7). En el ambiente de sequía con N alto, la única diferencia con los otros ambientes, fue que los híbridos modernos alcanzaron la antesis en igual

Cuadro 6. Días a antesis (A), floración femenina (FF), madurez fisiológica (MF), intervalo antesis-floración femenina (A-FF) e intervalo floración femenina-madurez fisiológica (FF-MF), para los híbridos y los criollos en promedio de los ambientes de sequía y riego con N alto y bajo, primavera-otoño 2002. Montecillo, Edo. de México.

| Variedades        | A        | FF       | MF         | A-FF   | FF-MF    |
|-------------------|----------|----------|------------|--------|----------|
| Sequía con N bajo |          |          |            |        |          |
| Híbridos          | 84 (901) | 87 (939) | 142 (1446) | 3 (38) | 55 (507) |
| Criollos          | 79 (848) | 87 (942) | 123 (1266) | 8 (94) | 36 (324) |
| DSH ( $p<0,05$ )  | 1 (5)    | 1 (6)    | 1 (5)      | 1 (2)  | 1 (7)    |
| Sequía con N alto |          |          |            |        |          |
| Híbridos          | 84 (902) | 87 (939) | 144 (1453) | 3 (37) | 57 (514) |
| Criollos          | 79 (845) | 88 (933) | 124 (1274) | 9 (88) | 36 (341) |
| DSH ( $p<0,05$ )  | 1 (5)    | 1 (6)    | 1 (5)      | 1 (2)  | 1 (7)    |
| Riego con N bajo  |          |          |            |        |          |
| Híbridos          | 82 (880) | 85 (914) | 147 (1492) | 3 (34) | 62 (577) |
| Criollos          | 79 (847) | 86 (922) | 128 (1313) | 7 (75) | 42 (391) |
| DSH ( $p<0,05$ )  | 1 (3)    | 1 (5)    | 1 (4)      | 1 (3)  | 1 (6)    |
| Riego con N alto  |          |          |            |        |          |
| Híbridos          | 82 (875) | 85 (915) | 150 (1518) | 3 (40) | 65 (602) |
| Criollos          | 79 (842) | 86 (926) | 130 (1325) | 7 (74) | 44 (399) |
| DSH ( $p<0,05$ )  | 1 (3)    | 1 (5)    | 1 (4)      | 1 (5)  | 1 (7)    |

Los números entre paréntesis representan los grados día ( $^{\circ}\text{Cd}$ ).

número de días antes que los híbridos antiguos y la floración femenina 3 días antes que estos, y en los ambientes de riego con N bajo y con alto, la floración femenina en los híbridos modernos ocurrió 2 días después que en los híbridos antiguos (Cuadro 7). La reducción en el número de días a antesis y floración femenina, y el intervalo antesis-floración femenina en los híbridos modernos es indicativa de mecanismos de resistencia a sequía que contribuyen al rendimiento de grano a través de una rápida emergencia y crecimiento de los estigmas, que coincide con una alta disponibilidad de polen viable, características fenológicas favorables al establecimiento de un alto número de granos; un intervalo floración femenina-madurez fisiológica largo es indicativo de una alta concentración de clorofila en un área foliar funcional, que puede mantener una alta tasa de fotosíntesis durante el periodo de llenado

del grano y favorecer un mayor peso del grano (Campos et al. 2004).

El rendimiento de grano estuvo negativa y significativamente relacionado con el intervalo antesis-floración femenina ( $\text{RG}=\text{AFF}(-0,37)+6,1$ ,  $R=-0,67$ ,  $p<0,01$ ) (Figura 4a) y positiva y significativamente asociado con el intervalo floración femenina-madurez fisiológica ( $\text{RG}=\text{FFMF}(0,009)-0,02$ ,  $r=0,76$ ,  $p<0,01$ ) (Figura 4b); los híbridos modernos tuvieron un intervalo antesis-floración femenina más corto que los híbridos antiguos y los criollos, y un intervalo floración femenina-madurez fisiológica más largo que los híbridos antiguos y los criollos. La notoria reducción en el intervalo antesis-floración femenina asociada con una rápida tasa de crecimiento de la mazorca en condiciones de estrés hídrico y N bajo es el principal mecanismo de resistencia a sequía en las etapas de floración y es también indicativo

Cuadro 7. Días a antesis (A), floración femenina (FF), madurez fisiológica (MF), intervalo antesis-floración femenina (A-FF) e intervalo floración femenina-madurez fisiológica (FF-MF), para los híbridos modernos y antiguos, y los criollos en los ambientes de sequía y riego con N alto y bajo, primavera-otoño 2002. Montecillo, Edo. de México.

| Variedades        | A        | FF       | MF         | A-FF   | FF-MF    |
|-------------------|----------|----------|------------|--------|----------|
| Sequía con N bajo |          |          |            |        |          |
| Híbridos modernos | 83 (885) | 86 (927) | 145 (1468) | 3 (42) | 59 (541) |
| Híbridos antiguos | 85 (917) | 89 (952) | 140 (1424) | 4 (35) | 51 (472) |
| Criollos          | 79 (848) | 87 (942) | 123 (1266) | 8 (94) | 36 (324) |
| DSH ( $p<0,05$ )  | 1 (13)   | 2 (15)   | 1 (13)     | 1 (6)  | 2 (19)   |
| Sequía con N alto |          |          |            |        |          |
| Híbridos modernos | 84 (902) | 86 (926) | 147 (1483) | 2 (24) | 61 (557) |
| Híbridos antiguos | 84 (902) | 89 (951) | 142 (1423) | 5 (49) | 53 (472) |
| Criollos          | 79 (845) | 88 (933) | 124 (1274) | 9 (88) | 36 (341) |
| DSH ( $p<0,05$ )  | 1 (13)   | 2 (14)   | 1 (13)     | 1 (6)  | 2 (19)   |
| Riego con N bajo  |          |          |            |        |          |
| Híbridos modernos | 84 (902) | 86 (925) | 150 (1517) | 2 (23) | 64 (592) |
| Híbridos antiguos | 81 (859) | 84 (904) | 145 (1467) | 3 (45) | 61 (563) |
| Criollos          | 79 (847) | 86 (922) | 128 (1313) | 7 (75) | 42 (391) |
| DSH ( $p<0,05$ )  | 1 (8)    | 1 (12)   | 1 (10)     | 1 (8)  | 2 (15)   |
| Riego con N alto  |          |          |            |        |          |
| Híbridos modernos | 83 (887) | 86 (926) | 151 (1529) | 3 (39) | 65 (603) |
| Híbridos antiguos | 81 (863) | 84 (904) | 149 (1506) | 3 (41) | 65 (602) |
| Criollos          | 79 (842) | 86 (926) | 130 (1325) | 7 (74) | 44 (399) |
| DSH ( $p<0,05$ )  | 1 (8)    | 1 (12)   | 1 (10)     | 1 (12) | 2 (19)   |

Los números entre paréntesis representan los grados día ( $^{\circ}\text{Cd}$ ).

de tolerancia a una reducida tasa de fotosíntesis durante la floración (Edmeades et al. 2000, Andrade et al. 2002), mientras que un incremento en la actividad fotosintética del área foliar verde, después de la floración femenina en condiciones de estrés hídrico y N bajo, podría constituir uno de los principales factores para obtener mayores ganancias de rendimiento de grano, sobre todo cuando el estrés ocurre en la parte terminal del ciclo de la planta (Campos et al. 2004).

#### ***Genotipos modernos vs genotipos antiguos y criollos en sequía y N bajo***

Los híbridos modernos H-40, H-48, H-34 y H-42 tuvieron mayor número de días y grados día a antesis y floración femenina que el híbrido H-44; el H-34 tuvo mayor número de días y grados día a madurez fisiológica que los híbridos H-40, H-48, H-44 y H-42; los híbridos H-48 y H-34 tuvieron un intervalo floración femenina-

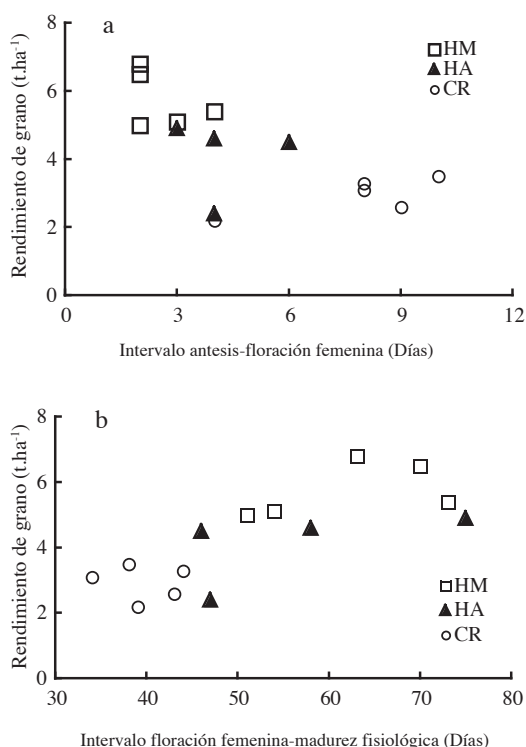


Fig. 4. Relación entre el rendimiento de grano y el intervalo antesis-floración femenina (a) y el intervalo floración femenina-madurez fisiológica (b) en promedio de los híbridos modernos y antiguos, y las variedades criollas en riego, sequía y N alto y bajo. Montecillo, Edo. de México. 2002.

madurez fisiológica más largo que los híbridos H-40, H-44 y H-42 en promedio de todos los ambientes (Cuadro 8). El híbrido antiguo H-28 tuvo mayor número de días y grados día a antesis que los híbridos H-33, H-30 y H-32; los híbridos H-28 y H-30 presentaron mayor número de días y grados día a floración femenina que los híbridos H-33 y H-32; el híbrido H-33 tuvo mayor número de días a madurez fisiológica que los híbridos H-28, H-30 y H-32; el mayor número de días y grados día a floración femenina y madurez fisiológica registrados por el híbrido H-33 se reflejó en un intervalo antesis-floración femenina más corto y un intervalo floración femenina-madurez

fisiológica más largo que los híbridos H-28, H-30 y H-32, respectivamente (Cuadro 8). Los criollos Col. 1, Col. 3 y Col. 2 tuvieron mayor número de días y grados día a antesis y floración femenina que los criollos Col. 5 y CP#586; los criollos Col. 1, Col. 3 y Col. 5 presentaron mayor número de días y grados día a madurez fisiológica que los criollos Col. 2 y CP#586; los criollos Col. 1, Col. 3, Col. 2 y Col. 5 tuvieron un intervalo antesis-floración femenina más largo que el criollo CP#586, y los criollos Col. 1, Col. 3, Col. 5 y CP#586 tuvieron un intervalo floración femenina-madurez fisiológica más largo que el criollo Col. 2 (Cuadro 8). Los genotipos modernos H-40 y H-48, el híbrido antiguo H-28 y los criollos Col. 1, Col. 3 y Col. 2, sobresalientes en rendimiento de grano tuvieron mayor número de días y grados día a antesis, floración femenina, madurez fisiológica e intervalo floración femenina-madurez fisiológica; otros estudios realizados en híbridos de diferentes eras y variedades de polinización abierta, en diferentes ambientes y densidades de población han determinado que los híbridos modernos y variedades con más alto rendimiento de grano, biomasa aérea final e índice de cosecha también tuvieron un intervalo floración femenina-madurez fisiológica más largo que los genotipos de menor rendimiento (Russell 1991).

El alto rendimiento de grano producido por los híbridos modernos en comparación con los híbridos antiguos y criollos, en los ambientes de sequía con N bajo y alto, y riego con N bajo y alto es resultado de una acumulación alta de biomasa en la planta que es eficientemente asignada a mazorcas de mayores dimensiones (longitud y diámetro) que se forman en un largo periodo de llenado del grano (intervalo floración femenina-madurez fisiológica). Es notoria la importancia de un corto intervalo antesis-floración femenina para la determinación del número de granos y un largo intervalo floración femenina-madurez fisiológica, para la producción de asimilados en el área foliar verde durante el periodo de llenado del grano. Estos atributos agronómicos y fisiológicos de las plantas bien podrían ayudar a establecer criterios de selección más eficaces, para el mejoramiento

Cuadro 8. Días a antesis (A), floración femenina (FF), madurez fisiológica (MF), intervalo antesis-floración femenina (A-FF) e intervalo floración femenina-madurez fisiológica (FF-MF), para los híbridos modernos y antiguos, y los criollos en promedio de riego, sequía, N alto y bajo, primavera-otoño 2002. Montecillo, Edo. de México.

| Variedades               | A        | FF       | MF         | A-FF     | FF-MF    |
|--------------------------|----------|----------|------------|----------|----------|
| <b>Híbridos modernos</b> |          |          |            |          |          |
| H-40                     | 86 (912) | 88 (935) | 151 (1526) | 2 (23)   | 63 (591) |
| H-48                     | 84 (891) | 86 (912) | 156 (1574) | 2 (21)   | 70 (662) |
| H-34                     | 85 (905) | 89 (951) | 162 (1623) | 4 (46)   | 73 (672) |
| H-44                     | 78 (828) | 81 (866) | 135 (1370) | 3 (38)   | 54 (504) |
| H-42                     | 85 (905) | 87 (922) | 138 (1406) | 2 (17)   | 51 (484) |
| <b>Híbridos antiguos</b> |          |          |            |          |          |
| H-33                     | 85 (905) | 88 (935) | 163 (1639) | 3 (30)   | 75 (704) |
| H-28                     | 89 (951) | 93 (991) | 151 (1526) | 4 (40)   | 58 (535) |
| H-30                     | 83 (887) | 89 (951) | 135 (1370) | 6 (64)   | 46 (419) |
| H-32                     | 75 (795) | 79 (840) | 126 (1292) | 4 (45)   | 47 (452) |
| <b>Criollos</b>          |          |          |            |          |          |
| Col. 1                   | 82 (870) | 92 (983) | 130 (1320) | 10 (113) | 38 (337) |
| Col. 3                   | 81 (860) | 89 (951) | 133 (1352) | 8 (91)   | 44 (401) |
| Col. 2                   | 83 (877) | 91 (970) | 125 (1283) | 8 (93)   | 34 (313) |
| Col. 5                   | 78 (828) | 87 (922) | 130 (1320) | 9 (94)   | 43 (398) |
| CP#586                   | 72 (765) | 76 (805) | 115 (1190) | 4 (40)   | 39 (385) |
| Media general            | 82 (872) | 87 (924) | 139 (1414) | 5 (54)   | 53 (490) |
| DSH ( $p<0,05$ )         | 3 (35)   | 4 (41)   | 5 (49)     | 2 (23)   | 7 (65)   |

Los números entre paréntesis representan los grados día (°Cd).

genético del rendimiento de grano en maíz bajo condiciones de estrés hídrico y N bajo en los sistemas de producción de secano.

## CONCLUSIONES

Los híbridos fueron superiores a los criollos en el rendimiento de grano, biomasa aérea final, índice de cosecha, longitud y diámetro de mazorca, número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> y granos.hilera<sup>-1</sup>, días y grados día a antesis y madurez fisiológica e intervalo floración femenina-madurez fisiológica, y tuvieron un intervalo antesis-floración femenina más corto que los criollos en condiciones de

sequía y N bajo; los criollos superaron a los híbridos únicamente en el peso individual del grano.

Los híbridos modernos fueron mejores que los híbridos antiguos en el rendimiento de grano, biomasa aérea final, longitud de mazorca, número de granos.hilera<sup>-1</sup> y peso individual de grano, y mejores que los criollos en rendimiento de grano, biomasa aérea final, índice de cosecha, longitud y diámetro de mazorca, número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> y granos.hilera<sup>-1</sup>.

Los híbridos antiguos superaron a los criollos en rendimiento de grano, biomasa aérea final, índice de cosecha, diámetro de mazorca, número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> y granos.hilera<sup>-1</sup>.

Los híbridos modernos alcanzaron la antesis y floración femenina en menor tiempo que los

híbridos antiguos y tuvieron un intervalo antesis-floración femenina más corto con mayor tiempo a madurez fisiológica y un intervalo floración femenina-madurez fisiológica más largo que los híbridos antiguos.

Los híbridos antiguos alcanzaron la antesis y madurez fisiológica en mayor tiempo que los criollos con intervalos antesis-floración femenina y floración femenina-madurez fisiológica más cortos que los criollos en condiciones de sequía y N bajo; los criollos tuvieron mayor peso individual de grano que los híbridos antiguos.

El rendimiento de grano estuvo relacionado significativa y positivamente con la biomasa aérea final, índice de cosecha, longitud y diámetro de mazorca, y número de hileras.mazorca<sup>-1</sup> y granos.hilera<sup>-1</sup>, y el intervalo floración femenina-madurez fisiológica, y negativamente con el intervalo antesis-floración femenina.

Los híbridos modernos obtuvieron su alto rendimiento de grano produciendo biomasa alta que fue asignada en proporción alta a mazorcas con mayores dimensiones, formadas en un periodo de llenado del grano más largo que los híbridos antiguos y los criollos.

### AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Susana Aspíroz Rivero y los M. C. Gustavo Velázquez Cardelas y Juan Virgen Vargas, y el Dr. Alejandro Espinosa Calderón, Directora e Investigadores del Departamento de Maíz del CAEVAMEX, INIFAP, Chapingo, México, respectivamente; por haber proporcionado la semilla básica de los híbridos para secano utilizados en el presente estudio y la información genealógica correspondiente. También, se agradece a los CC. Juan Raymundo Alvarado Espinosa y José Fidel Pérez Romero, su valiosa colaboración.

### LITERATURA CITADA

- AHMADZADEH A., LEE E.A., TOLLENAAR M. 2004. Heterosis for leaf CO<sub>2</sub> exchange rate during the grain-filling period in maize. *Crop Science* 44:2095-2100.
- ANDRADE F.H., ECHARTE L., RIZALLI R., DELLA MAGGIORA A., CASANOVAS M. 2002. Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Science* 42:1173-1179.
- BÄZINGER M., EDMEADES G.O., BECK D., BELLON M. 2000. Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize: From theory to practice. CIMMYT. México, D.F. México. 68 p.
- BOLAÑOS J., EDMEADES G.O. 1996. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *Field Crops Research* 48:65-80.
- CADAHIA C. 1998. Fertirrigación (cultivos hortícolas y ornamentales). Mundi-Prensa, Madrid, Barcelona. Mexico, D.F. 475 p.
- CAMPOS H., COOPER M., HABBEN J.E., EDMEADES G.O., SCHUSSLER J.R. 2004. Improving drought tolerance in maize: a view from industry. *Field Crops Research* 90:19-34.
- CARLONE M.R., RUSSELL W.A. 1987. Response to plant densities and nitrogen levels for four maize cultivars from different eras of breeding. *Crop Science* 27:465-470.
- CASTAÑEDA-SAUCEDO M.A.C., LÓPEZ-CASTAÑEDA C., MOLINA-MORENO J., COLINAS-LEÓN T.B., HERNÁNDEZ-LIVERA A. 2004. Crecimiento y desarrollo de cebada y trigo. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27:167-175.
- DUVICK D.N. 1984. Genetic contributions to yield gains of U.S. hybrid maize, 1930 to 1980. Genetic contributions to yield gains of five major crop plants, pp. 15-47. In: W.R. Fehr (ed). *Crop Science Society of America*. Madison, WI. Special Publication N.º 7.
- DUVICK D.N. 1992. Genetic contributions to advances in yield of U.S. maize. *Maydica* 37:69-79.
- ECHARTE L., ANDRADE F.H., VEGA C.R.C., TOLLENAAR M. 2004. Kernel number determination in Argentinean maize hybrids released between 1965 and 1993. *Crop Science* 44:1654-1661.
- EDMEADES G.O., BOLAÑOS J., ELINGS A., RIBAUT J.-M., BÄZINGER M., WESTGATE M.E. 2000. The role and regulation of the anthesis-silking interval in maize. Physiology and modeling kernel set in maize, pp. 43-73. In: M.E. Westgate y K.J. Boote (eds). *Crop Science Society of America*. Madison, WI. Special Publication N.º 29.

- GARCÍA-PACHECO A.D., LÓPEZ-CASTAÑEDA C. 2002. Temperatura base y tasa de extensión foliar del maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:381-386.
- GRANT R.F., JACKSON B.S., KINIRY J.R., ARKIN G.F. 1989. Water deficit timing effects on yield components in maize. *Agronomy Journal* 81:61-65.
- MUCHOW R.C. 1994. Effect of nitrogen on yield determination in irrigated maize in tropical and subtropical environments. *Field Crops Research* 38:1-13.
- NeSMITH D.S., RITCHIE J.T. 1992. Effects of soil water-deficits during tassel emergence on development and yield component of maize (*Zea mays*). *Field Crops Research* 28:251-256.
- NOVOA R., LOOMIS R.S. 1981. Nitrogen and plant production. *Plant and Soil* 58:177-204.
- REYES-RAMONES R.E., RODRÍGUEZ-ONTIVEROS J.L.†, LÓPEZ-CASTAÑEDA C. 2000. Resistencia a sequía de líneas S<sub>1</sub> derivadas de la variedad de maíz criollo de Ibarra. *Agricultura Técnica en México* 26(2):159-172.
- RUSSELL W.A. 1991. Genetic improvement of maize yields. *Advances in Agronomy* 46:245-298.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, ME). 2007. Servicio de Información Estadística Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de Producción Agrícola., México, D.F. ([http://www.siap.gob.mx/agricola\\_siap/ientidad/index/jsp](http://www.siap.gob.mx/agricola_siap/ientidad/index/jsp)).
- SAS (SAS INSTITUTE INC), The SAS System release 9.0 for windows. Cary, North Carolina, United States: SAS Institute, 2007.
- TOLLENAAR M., AHMADZADEH A., LEE E.A. 2004. Physiological basis of heterosis for grain yield in maize. *Crop Science* 44:2086-2094.
- TSAI C.Y., HUBER D.M., GLOVER D.H., WARREN H.L. 1984. Relationship of N deposition to grain yield and N response of three maize hybrids. *Crop Science* 24:277-281.
- WESTGATE M.E., GRANT, D.T. 1989. Water deficits and reproductive development in maize. Response of the reproductive tissues to water deficits at anthesis and mid-grain filling. *Plant Physiology* 91:852-867.
- ZAIDI P.H., SRINIVASAN G., CÓRDOVA H.S., SÁNCHEZ C. 2004. Gains from improvement for mid-season drought tolerance in tropical maize (*Zea mays* L). *Field Crops Research* 89:135-152.
- ZEA J.L., QUEMÉ J.L., ÁGUILUZ A., BRIZUELA L., CÓRDOVA H. 1991. Efecto de la selección recurrente por sequía sobre el rendimiento y características agronómicas de líneas S<sub>1</sub> de maíz (*Zea mays* L.) evaluadas en tres ambientes de Centro América, 1989. *Agronomía Mesoamericana* 2:11-18.

Copyright of *Agronomía Costarricense* is the property of Universidad de Costa Rica and its content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.