

Rendimiento de híbridos de maíz grano blanco en cinco localidades de Valles Altos de México

Aarón Martínez-Gutiérrez¹
Benjamín Zamudio-González^{2§}
Margarita Tadeo-Robledo³
Alejandro Espinosa-Calderón²
João Carlos Cardoso-Galvão¹
Griselda Vázquez-Carrillo²
Antonio Turrent-Fernández²

¹Universidad Federal de Vicosa-Campus Vicosa. Avenida Peter Henry Rolfs, Vicosa, Minas Gerais, Brasil. (aaron_0715@hotmail.com; cardosogalvaaj@gmail.com). ²Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Coatlinchan, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56250. (espinoale@yahoo.com.mx; aturrent37@yahoo.com.mx; Griselda_vazquez@yahoo.com). ³Ingeniería Agrícola-Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán-UNAM. Carretera Cuautitlán-Teoloyucán km 2.5, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México. CP. 54714. (tadeorobledo@yahoo.com).

§Autor por correspondencia: bzamudiog@yahoo.com.mx.

Resumen

Dada la insuficiencia en producción de maíz, que se traduce en la importación de hasta 15 millones de toneladas de grano, urge elevar la productividad en este cultivo, utilizando más y mejores variedades. El objetivo de este trabajo fue determinar las características agronómicas de híbridos blancos en cinco ambientes diferentes, la respuesta mejor, así como definir el efecto de la interacción genotipo \times ambiente sobre el rendimiento, y otras características evaluadas para los Valles Altos de México (2 200 a 2 600 msnm). En el ciclo agrícola primavera-verano 2016, se evaluaron diez híbridos de maíz en cinco localidades mediante un diseño experimental de bloques completos al azar, con cuatro repeticiones. El análisis fue factorial considerando como factores los ambientes (5), los híbridos (10), así como la interacción ambiente \times híbridos. Se evaluaron ocho variables agronómicas. Se realizaron Anovas y comparaciones de medias Tukey $p=0.05$. Ambos factores presentaron respuestas diferenciales y las variables evaluadas estuvieron influenciadas por el efecto del ambiente. Los híbridos de productividad media mayor fueron ATZIRI PUMA (12 t ha⁻¹) y TSIRI PUMA (11.8 t ha⁻¹) seguidos por los híbridos H-50, H-66 y H-70, que produjeron 11.5, 11.6 y 11.6 t ha⁻¹ respectivamente. Considerando que H-50 es uno de los híbridos de mayor uso comercial en los Valles Altos, los cuatro híbridos referidos de mayor rendimiento de grano blanco, podrían tener perspectivas de uso comercial, en los ambientes manejados en este estudio.

Palabras clave: *Zea mays* L., ambiente, androesterilidad, mejoramiento genético.

Recibido: julio de 2018

Aceptado: octubre de 2018

Introducción

En México el cultivo de maíz es el más importante, por ser base de la alimentación de los mexicanos, se siembran alrededor de 8.5 millones de hectáreas. Sin embargo, a nivel nacional sólo se producen 22 millones de toneladas de grano de maíz, lo que obliga prácticamente a la importación de 10 a 12 millones de toneladas de grano amarillo, ya que el consumo total aparente de maíz es de 32 a 34 millones de toneladas. El rendimiento promedio que se alcanza es de 2.8 t ha⁻¹ (Turrent, 2009). Las importaciones durante el año 2018 se estima que llegarán a 15 millones de toneladas, ubicando a México como el importador de este grano número uno a nivel mundial, desplazando a Japón (Espinosa y Tadeo, 2018).

Particularmente en el Estado de México se produce grano de maíz en una superficie de 530 mil hectáreas, de las cuales 84% se cultivan en condiciones de temporal y el resto mediante riego. La producción estatal es de 2.3 millones de toneladas con rendimiento promedio de 4.4 t ha⁻¹ (SIAP, 2016). El rendimiento en el Estado de México, debido a la baja producción por unidad de superficie, podría elevarse si se emplean más variedades mejoradas, con potenciales altos de rendimiento (Virgen *et al.*, 2016). Por ello, es urgente aprovechar las variedades mejoradas disponibles que generan las instituciones públicas de investigación.

La producción baja de maíz se asocia con distribución irregular de lluvias, heladas tempranas, granizadas, profundidad del suelo, textura de la capa arable, pendiente y fertilidad baja de los suelos, grado alto de erosión, además de variedades de rendimiento bajo, tardías y susceptibles al acame (María *et al.*, 2003). Por ello, se requieren genotipos que mantengan una respuesta estable en diferentes ambientes y años, además de un rendimiento alto, lo cual es factible en función del potencial genético del híbrido (Arellano *et al.*, 2011). El incremento en rendimiento está supeditado 60% al potencial genético del híbrido y 40% a las prácticas de manejo de cultivo (Espinosa *et al.*, 2008a; Arellano *et al.*, 2011).

En los últimos años, se realizan trabajos constantes en el programa de mejoramiento genético del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), para aumentar el rendimiento de grano de maíz con la liberación de nuevas variedades mejoradas (Espinosa *et al.*, 2003; Espinosa *et al.*, 2008b; Espinosa *et al.*, 2010; Espinosa *et al.*, 2012; Tadeo *et al.*, 2016a; Espinosa *et al.*, 2018), en paralelo se efectúan investigaciones sobre adopción de las mejores prácticas de la fertilización química y foliar y manejo en el cultivo de maíz en Valles Altos (Zamudio *et al.*, 2015).

Desde 1992, investigadores del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) han trabajado con fuentes de esterilidad masculina y en su incorporación a los progenitores de híbridos de maíz (Tadeo *et al.*, 2010; Tadeo *et al.*, 2014a; Tadeo *et al.*, 2016a; Espinosa *et al.*, 2018). La androesterilidad (AE) es la incapacidad que tienen las plantas para producir anteras, polen o granos de polen funcionales; este esquema se utiliza en la producción de semilla híbrida de maíz para incrementar el rendimiento y la calidad genética de la semilla (Martínez *et al.*, 2005), con ello se evita el desespigue de las plantas y se favorece al productor, porque genera semilla con calidad genética y con precio más bajo (Tadeo *et al.*, 2015). En contraste, el uso de progenitores

fértiles, donde regularmente se alternan seis surcos de líneas hembra por dos de líneas macho (Tadeo *et al.*, 2013) resulta más costoso por la eliminación manual de la inflorescencia masculina antes de la liberación de polen.

En este sentido uno de los retos en los programas de mejoramiento genético es obtener genotipos con rendimientos mayores, pero con frecuencia el potencial de rendimiento es enmascarado por la interacción genotipo por ambiente (Lozano *et al.*, 2015). Para enfrentar estos problemas los programas de mejoramiento genético de maíz han generado una diversidad amplia de genotipos estables que no sean afectados por las condiciones ambientales.

Una variedad estable es aquella que tiene la capacidad de amortiguar o de ajustarse a las condiciones ambientales (Márquez, 1991). Reyes *et al.* (2017) mencionan que los progresos sustantivos en el incremento del rendimiento de grano se fundamentan en lograr la adaptación óptima del genotipo a cada ambiente de producción, así como la conjunción de caracteres deseables tales como la calidad del grano y la resistencia al estrés abiótico y biótico.

Por lo tanto, para la recomendación de cultivares de maíz para Valles Altos de México, es necesario evaluar los cultivares, en localidades diferentes, porque los cultivares evaluados en diferentes ambientes pueden presentar respuestas diferenciadas frente a las condiciones ambientales distintas, lo que caracteriza la interacción entre genotipos \times ambientes. En este contexto, la selección de variedades mejoradas debe ser el punto de partida para alcanzar rendimientos mayores. El objetivo de este trabajo fue determinar las características agronómicas de diez híbridos blancos en cinco ambientes diferentes, la respuesta mejor, así como definir el efecto de la interacción genotipo \times ambiente sobre el rendimiento y otras características para los Valles Altos de México.

Materiales y métodos

Este trabajo se realizó en el ciclo agrícola primavera-verano 2016 en cinco ambientes de los Valles Altos (2 200 a 2 600 msnm). El primer experimento se ubicó en Cuendó (longitud 19° 25' 39", latitud 99° 55' 12" y altitud de 2 519 m) y se sembró el 5 de abril. La precipitación en este sitio fue de 837 mm, el segundo se ubicó en Jocotitlán (longitud 19° 25' 39", latitud 99° 55' 12" y altitud de 2 519 msnm) y se sembró el 13 de abril. La precipitación fue de 837 mm, el tercero se ubicó en Ixtlahuaca (longitud 19° 36.937', latitud 99° 51.023' y altitud de 2 535 m), cuya fecha de siembra fue el 23 de abril, con una precipitación de 839 mm. El cuarto experimento se ubicó en Temascalcingo (longitud 19° 56', latitud 100° 0' y altitud 2 377 m) y se sembró el 03 de mayo, con una precipitación de 1181 mm. El último experimento se ubicó en Jilotepec (longitud 19° 25' 39", latitud 99° 55' 12" y altitud de 2 519 m) y se sembró el 25 de mayo, con una precipitación de 885 mm.

Las siembras se realizaron con 'punta de riego' una vez que la tierra dio punto de humedad, excepto en Cuendó que se sembró en seco. Después de la siembra, la dependencia y exposición al clima de los cinco sitios de estudio fue total del temporal de lluvia y en lo general no se presentaron meteoros negativos como granizadas o heladas al final del ciclo de cultivo. Los resultados de los análisis del suelo se presentan en el Cuadro 1.

La interpretación de la composición físico-química de los suelos muestra fertilidad baja, por presentar contenidos bajos de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico, así como deficiencia de nutrientes; excepto los sitios de Jocotitlán y Jilotepec que presentan suelos de fertilidad media porque contienen materia orgánica (2.12 y 2.48 respectivamente), ambos con textura franco arcilloso, pero en cationes intercambiables bajos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Condiciones física y químicas de los suelos en cinco ambientes de Valles Altos del Estado de México en los cuales se evaluaron 10 híbridos de maíz de grano blanco.

| Características | Cuendó | Jocotitlán | Ixtlahuaca | Temascalcingo | Jilotepec |
|----------------------------------|--------|------------------|------------|---------------|------------------|
| pH en agua | 5.06 | 5.6 | 5.13 | 6.75 | 5.45 |
| MO (%) | 1.89 | 2.12 | 1.69 | 1.91 | 2.48 |
| DA (g cm ⁻³) | 1.02 | 1.13 | 1.01 | 1.02 | 1.12 |
| Textura | Franco | Franco arcilloso | Franco | Franco | Franco arcilloso |
| CIC (meq 100 g ⁻¹ SS) | 11 | 10.1 | 13.9 | 11 | 14.8 |
| CE (ds m ⁻¹) | 0.22 | 0.34 | 0.68 | 0.83 | 0.6 |
| CC (%) | 19 | 22.9 | 21.4 | 22.3 | 27.2 |
| PMP (%) | 11.3 | 13.6 | 12.7 | 13.3 | 16.2 |
| Porosidad (%) | 35.8 | 43 | 40.2 | 42 | 51 |
| Ca (meq 100 g ⁻¹ SS) | 3.25 | 5.25 | 7.57 | 6.64 | 10.3 |
| Mg (meq 100 g ⁻¹ SS) | 1.33 | 2.39 | 4.07 | 3.24 | 3.84 |
| K (meq 100 g ⁻¹ SS) | 0.28 | 0.51 | 0.45 | 1.01 | 0.41 |

MO= materia orgánica; DA= densidad aparente; CIC= capacidad intercambio catiónico; CE= conductividad eléctrica; CC= capacidad de campo; PMP= punto de marchitez permanente.

En los cinco ambientes se evaluaron diez híbridos de maíz de grano blanco, seis con tecnología de androesterilidad (ATZIRI PUMA, TSIRI PUMA, H-47 AE, H-49 AE, H-51 AE, H-53 AE), los dos primeros generados en la FESC UNAM (Tadeo *et al.*, 2016a), los otros cuatro en el INIFAP (Espinosa *et al.*, 2018), tres con versiones fértiles (H-50, H-66, H-70) y un testigo comercial (Albatros) de ASGROW, estos últimos cuatro se utilizan con frecuencia en Valles Altos de México.

La sembradora de precisión se calibró para 95 000 semillas ha⁻¹ en surcos a 0.8 m de ancho. Las semillas se trataron con Cruiser[®] 5 FS (Thiametoxam: 3-(2-Cloro-1,3-tiazol-5- ilmetil)-1,3,5-oxadiazinan-4- ilideno (nitro) amino 50 mL 20 kg⁻¹) para control de plagas del suelo. La fertilización al suelo fue de 250-60-60 de NPK + mezcla de micronutrientes en dos etapas, a la siembra se fertilizó con la fórmula 100-60-40 de NPK. El resto de nitrógeno (150 N) se aplicó entre etapa V₄₋₁₀, fraccionado en partes iguales en función de la ocurrencia de precipitaciones y humedad del suelo.

El control de malezas fue mecánico con escardas en etapa inicial vegetativa y después se aplicaron herbicidas Callisto[®] Xtra (S Atrazine y Mesotrione 5 L ha⁻¹), para control de insectos del follaje Karate Zeon[®] (Lambda cihalotrin 250 mL ha⁻¹) y Denim[®] (Emamectina 100 mL ha⁻¹), Priori[®] Xtra (Azoxistrobina, Ciproconazol 350 mL ha⁻¹) contra enfermedades y Quilt (Azoxystrobin Propiconazol 800 mL ha⁻¹) en la floración. Este último actúa como regulador de crecimiento promoviendo el vigor y alargando el periodo de vida de la planta con incremento en el llenado de granos, debido que mejora la asimilación de CO₂ al mantenerse ‘verde’ y con ello continúa el proceso de la fotosíntesis, absorción del agua y translocación de nutrimentos a la mazorca, reduce la tasa de transpiración e inhibe la liberación de etileno, retrasando la senescencia de la planta.

Durante el ciclo del cultivo, las condiciones climáticas fueron favorables, con distribución de lluvias adecuadas, lo que permitió un desarrollo vegetativo y reproductivo adecuado, hasta llegar a su madurez fisiológica. Como parcela útil experimental se consideraron las dos líneas centrales de cada repetición con dos surcos de 3 m de longitud y 0.80 m entre surcos. El diseño de los tratamientos se formó al combinar el factorial de 5 ambientes \times 10 híbridos, con cuatro repeticiones, considerando como fuentes de variación los híbridos, ambientes y sus interacciones.

Las variables evaluadas fueron las siguientes: rendimiento de grano (kg ha^{-1}), calculado con la fórmula: $\text{rendimiento} = (\text{PC} \times \% \text{MS} \times \% \text{G} \times \text{FC}) / 8600$. Donde: PC= peso de mazorcas cosechadas (kg) en la unidad experimental; % MS= por ciento de materia seca de una muestra de grano de cinco mazorcas recién cosechadas; % G= por ciento de grano estimado a partir de cinco mazorcas, FC= factor de conversión para obtener el rendimiento de grano por hectárea, siendo el cociente de dividir 10 000 m^2 entre el tamaño de la parcela útil en m^2 y 8 600= es una constante para estimar el rendimiento de grano comercial con humedad de 14% (Tadeo *et al.*, 2014a). Se tomaron muestras representativas para calcular peso hectolítrico del grano (kg hL^{-1}), número de hileras, granos por hilera, granos por mazorca, peso de la mazorca (g), peso de grano por mazorca (g), e índice de grano. Las variables evaluadas se analizaron con el paquete estadístico SAS, versión 9.3. Las comparaciones de las medias se separaron con la prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.

Resultados y discusión

El análisis de varianza combinado detectó para el factor ambiente, diferencias altamente significativas para las siguientes variables: rendimiento de grano, peso hectolítrico, peso de grano de mazorca, peso de la mazorca e índice de grano (Cuadro 2). Para el factor híbrido se observaron diferencias altamente significativas para rendimiento de grano, peso hectolítrico, granos por mazorca, peso de grano por mazorca, peso de mazorca y para número de hileras y granos por hilera presentaron significancia estadística. No se observó diferencia significativa de la variable índice de grano para este factor (Cuadro 2).

Cuadro 2. Cuadrados medios y significancia estadística para siete variables evaluadas de diez híbridos de maíz de grano blanco en cinco ambientes de Valles Altos de México. Primavera-verano 2016.

| Fuente de variación | GL | Variables | | | | | | | |
|---------------------|-----|-----------|----------|--------|---------|------------|-----------|-----------|-----------|
| | | RG | PH | NH | GH | GM | PM | PGM | IG |
| Ambiente - A | 4 | 67.11** | 8106.8** | 4.7 ns | 13.4 ns | 11282.3 ns | 87720.5** | 41401.5** | 0.0221** |
| Repetición (A) | 15 | 1.65** | 147.5 ns | 3.9 ns | 10.9 ns | 6268.3 ns | 878.16** | 372.5** | 0.0012* |
| Híbrido - H | 9 | 8.89** | 1905.8** | 16.3* | 27* | 23758** | 2906.5** | 1775.5** | 0.0006 ns |
| AxH | 36 | 2.78** | 683.9** | 4 ns | 13.9* | 7270 ns | 953.3** | 513.3** | 0.001* |
| Error | 135 | 0.33 | 177.5 | 3.47 | 8.1 | 6162.1 | 99.77 | 61.7 | 0.0005 |
| Total | 199 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Media | - | 11.2 | 783.6 | 16.8 | 32.5 | 534.6 | 201.4 | 159.5 | 0.8 |
| CV (%) | - | 5.1 | 1.7 | 11.3 | 8.7 | 14.7 | 4.96 | 4.93 | 2.98 |

**= significativo a 1% por la prueba de F; *= significativo a 5%; ns= no significativo; GL= grados de libertad; CV= coeficiente de variación; RG= rendimiento de grano; PH= peso hectolítrico; NH= número de hileras; GH= granos por hilera; GM= granos por mazorca; PGM= peso de grano por mazorca; PM= peso de mazorca; IG= índice de grano.

En el factor de variación ambientes \times híbridos se detectó diferencia altamente significativa, para todas las variables excepto número de hileras y número de granos por mazorca (Cuadro 2). Estos resultados indican que en los ambientes los híbridos presentaron respuestas diferenciales y las variables evaluadas estuvieron influenciadas por el efecto del ambiente. Los coeficientes de variación para las variables medidas fueron del orden de 1.7 a 14.7%. El coeficiente de variación para rendimiento fue de 5.1% y la media aritmética fue de 11.2 t ha⁻¹, ajustado a 14% de humedad (Cuadro 2).

En medias de ambientes, se identificaron cinco grupos de significancia, que definen las respuestas contrastantes de los ambientes. El rendimiento promedio mayor correspondió a Jocotitlán con 12.4 t ha⁻¹ de grano, con una diferencia de 3.4 t ha⁻¹ en relación a Cuendó que rindió menos (9 t ha⁻¹) (Cuadro 3). El paquete tecnológico de este último ambiente fue de inversión baja relacionado con la dosis de fertilización y control de malezas; lo cual redujo el promedio del rendimiento de grano y vigor de las plantas. Además de las condiciones físico-químicas del suelo es considerado como de fertilidad baja (Cuadro 1). En paralelo, en Jocotitlán se observaron rendimientos en un rango de 9.9 hasta 14 t ha⁻¹ entre los híbridos evaluados (Cuadro 3), debido a que se adaptaron mejor a las condiciones edafo-climáticas y a un manejo agronómico apropiado, además que se sembró en punta de riego y se presentó un temporal de lluvias regular y suficiente durante el ciclo y esto permitió una respuesta positiva de rendimiento de grano.

Cuadro 3. Comparación de medias de rendimiento de grano (t ha⁻¹) al 14% de humedad, en cinco sitios de Valles Altos del Estado de México. INIFAP, 2016.

| Híbrido | Ixtlahuaca | Jilotepec | Temascalcingo | Jocotitlán | Cuendó | Medias de híbridos |
|---------------------|------------|-----------|---------------|------------|--------|--------------------|
| H-50 | 11.8 ab | 12.2 ab | 11.3 ab | 13.3 bcde | 9 a | 11.5 abc |
| ATZIRI PUMA | 12.4 a | 12.8 a | 11.7 a | 14 abcd | 8.9 a | 12 a |
| TSIRI PUMA | 11.3 abc | 12.8 a | 12.4 bcd | 12.5 ab | 9.9 a | 11.8 ab |
| H-47AE | 10.2 cd | 12 abc | 11.8 d | 11.8 abcd | 10.1 a | 11.1 c |
| H-49AE | 10.3 cd | 12 abc | 11 cd | 12.9 cde | 7.2 b | 10.5 d |
| H-51AE | 10.4 cd | 11.9 abc | 10.1 e | 9.9 e | 9.4 a | 10.4 d |
| H-53AE | 11.5 abc | 10.8 c | 10.7 e | 10 de | 7.1 b | 10 d |
| H-66 | 11.2 abc | 12.2 ab | 11.9 ab | 13.3 abcd | 9.4 a | 11.6 abc |
| H-70 | 10.8 bcd | 11.4 bc | 12.6 ab | 13.5 a | 9.5 a | 11.6 abc |
| ALBATROS | 9.6 d | 11.6 abc | 12.1 abc | 13.3 abc | 10.1 a | 11.3 bc |
| Medias de ambientes | 10.9 D | 12 B | 11.5 C | 12.4 A | 9.0 E | 11.2 |
| CV (%) | | | 5.1 | | | |

Medias con la misma letra minúscula en la columna y mayúscula en la línea son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05). CV= coeficiente de variación.

Estas respuestas contrastantes para el efecto ambiente, se justifica porque los ambientes se encuentran en condiciones agroclimáticas, tipos de suelos, fecha de siembra diferentes, principalmente por las características de los materiales que son genéticamente diferentes, por lo que es pertinente realizar trabajos de investigación con estos genotipos en ambiente y manejo específicos en Valles Altos del Estado de México (Canales *et al.*, 2017; López *et al.*, 2017).

En la comparación de medias de híbridos considerando los cinco ambientes, se observaron respuestas similares y con rendimiento mayor en los siguientes híbridos, ATZIRI PUMA, TSIRI PUMA, H-50, H-66 y H-70 con 12, 11.8, 11.5, 11.6 y 11.6 t ha⁻¹ de grano, respectivamente. Los híbridos que presentaron rendimiento menor fueron: H-49 AE, H-51 AE y H-53 AE con 10.5, 10.4 y 10 t ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 3). Con una diferencia de 1.5 a 2 t ha⁻¹. Los híbridos ATZIRI PUMA, TSIRI PUMA que presentaron rendimientos mayores fueron generados por la UNAM (Tadeo *et al.*, 2016a) y rendimientos menores los liberó el INIFAP (Espinosa *et al.*, 2008b; Espinosa *et al.*, 2012; Espinosa *et al.*, 2018) y se consideran de esquema androesterilidad (AE). Esta tecnología es posible debido a la mezcla de semilla androestéril y fértil (F), permitiendo la esterilidad masculina en otros materiales (Espinosa *et al.*, 2009; Tadeo *et al.*, 2010; Tadeo *et al.*, 2014 b). Lo anterior, se justifica en los resultados similares de los híbridos H-49 AE, H-51 AE y H-53 AE en el presente trabajo, además que entre los tres materiales existe coincidencia en una o dos de las líneas que integran su estructura como híbridos (Tadeo *et al.*, 2014a).

No obstante, cuando se compara las medias de híbridos por ambiente específico, éstos híbridos androestériles (H-AE) exhibieron igual y en algunos casos producción mayor al comparar respecto a los genotipos de versión fértil (Cuadro 3), verificando apenas una variación pequeña de la respuesta de los genotipos en algunos ambientes. Esto corrobora los resultados de investigaciones anteriores en donde las versiones androestériles igualan o superan en rendimientos al de las fértiles (Martínez *et al.*, 2005; Tadeo *et al.*, 2007; Tadeo *et al.*, 2014 a; Tadeo *et al.*, 2014b; Canales *et al.*, 2017). Lo anterior, se debe a que las versiones androestériles son isogénicas de las fértiles, sólo difieren en la producción o no, de granos de polen (Martínez *et al.*, 2005; Ramírez, 2006; Tadeo *et al.*, 2007; Tadeo *et al.*, 2014 a; Tadeo *et al.*, 2014b). Los híbridos H-49 AE, H-51 AE y H-53 AE superaron los rendimientos reportados en trabajos recientes (Tadeo *et al.*, 2013; Tadeo *et al.*, 2014a; Tadeo *et al.*, 2016b; Canales *et al.*, 2017), lo que confirma la capacidad productiva de estos materiales acompañado de las prácticas agrícolas mejores en ambientes de producción diferentes (Zamudio *et al.*, 2015).

En la comparación de medias de híbridos, el H-47AE (Espinosa *et al.*, 2018) presentó rendimiento estadísticamente similar con los siguientes híbridos; H-50, H-66, H-70, y el testigo comercial ALBATROS, que utilizan comúnmente los productores de Valles Altos. Los rendimientos superiores mostrados en este estudio por la esterilidad masculina en los híbridos (AE) ratifican a estos genotipos como competitivos con ventajas agronómicas favorables para promover su uso por los productores (Tadeo *et al.*, 2016a).

Con relación a las otras variables agronómicas al realizar la comparación de medias del factor ambiente se identificaron diferencia significativa en la mayoría de las variables excepto en número de hileras, granos por hilera y granos por mazorca (Cuadro 4); sin embargo, para el factor híbrido, todas las variables fueron contrastantes con excepción de índice de grano que fue similar en todos los híbridos (Cuadro 5). Estas diferencias estadísticas observadas en las características agronómicas, en especial cuando se comparan los genotipos (Cuadro 5), se debe a que los híbridos mostraron expresión genética diferente excepto los materiales con esquema de androesterilidad que presentan genes génico-citoplásmicos relacionados con la esterilidad masculina tipo C que causan que en la versión androestéril no se produzca polen (Tadeo *et al.*, 2007; Tadeo *et al.*, 2010; Tadeo *et al.*, 2014b).

Cuadro 4. Comparación de medias para ocho variables en cinco sitios en Valles Altos del Estado de México. Promedio de 10 híbridos blancos. INIFAP, 2016.

| Ambiente | Variables | | | | | | | |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|------------|-----------|
| | RG (t ha ⁻¹) | PH (g hL ⁻¹) | NH (núm) | GH (núm) | GM (núm) | PM (g) | PGM (g) | IG (%) |
| Temascalcingo | 11.5 c | 797 a | 16.5 a | 31.5 a | 519.7 a | 174.5 d | 141 d | 0.8 a |
| Cuendó | 9 e | 778 c | 16.1 a | 32.2 a | 519.8 a | 155 e | 124.1 e | 0.8 a |
| Ixtlahuaca | 10.9 d | 787 b | 16.9 a | 32.5 a | 549.9 a | 209.8 b | 167.7 b | 0.8 a |
| Jocotitlán | 12.4 a | 794 ab | 16.2 a | 32.6 a | 528.7 a | 190.7 c | 155 c | 0.81 a |
| Jilotepec | 12 b | 762 d | 16.8 a | 33.1 a | 555 a | 277 a | 209.1 a | 0.75 b |
| Media general | 11.2 | 784 | 16.8 | 32.5 | 534.6 | 201.4 | 159.4 | 0.8 |
| CV (%) | 5.1 | 1.7 | 11.3 | 8.7 | 14.7 | 4.96 | 4.93 | 2.98 |

Medias con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). CV= coeficiente de variación; RG= rendimiento de grano; PH= peso hectolitrico; NG= número de hileras; GH= granos por hilera; GM= granos por mazorca; PGM= peso de grano por mazorca; PM= peso de mazorca; IG= índice de grano.

Los valores promedios de las características de la mazorca fueron: peso hectolítrico de 78.4 kg L⁻¹, número de hileras 16.8, granos por hilera de 32.5, granos por mazorca de 534.6 g, peso de grano por mazorca 201.4 g y el índice de grano fue de 0.8%, pero sin presentar diferencia significativa en el factor híbrido (Cuadro 4 y 5).

Cuadro 5. Comparación de medias de ocho variables de diez híbridos, considerando los promedios de cinco ambientes de Valles Altos del Estado de México. INIFAP, 2016.

| Híbridos | Variables | | | | | | | |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|------------|-----------|
| | RG (t ha ⁻¹) | PH (g hL ⁻¹) | NH (núm) | GH (núm) | GM (núm) | PM (g) | PGM (g) | IG (%) |
| H-50 | 11.5 abc | 783 bcd | 18 a | 34 a | 590 a | 212.2 ab | 168 abc | 0.79 a |
| ATZIRI PUMA | 12 a | 783 bcd | 16 ab | 33 ab | 540 abc | 217.7 a | 173 a | 0.8 a |
| TSIRI PUMA | 11.8 ab | 794 ab | 16 ab | 34 a | 548 abc | 203.9 bc | 162 cd | 0.8 a |
| H-47AE | 11.1 c | 788 abc | 16 ab | 32 ab | 504 bc | 196.7 cde | 155 def | 0.79 a |
| H-49AE | 10.5 d | 793 ab | 16 ab | 32 ab | 526 abc | 186.9 ef | 148 fg | 0.79 a |
| H-51AE | 10.4 d | 779 cd | 18 a | 30 b | 529 abc | 184.5 f | 147 g | 0.8 a |
| H-53AE | 10 d | 774 d | 16 b | 32 ab | 488 c | 190.9 def | 150 efg | 0.79 a |
| H-66 | 11.6 abc | 771 d | 18 a | 33 ab | 562 abc | 203.3 bc | 163 bcd | 0.8 a |
| H-70 | 11.6 abc | 772 d | 18 a | 33 ab | 571 ab | 218.3 a | 171 ab | 0.78 a |
| ALBATROS | 11.3 bc | 800 a | 16 b | 32 ab | 488 c | 199.5 cd | 158 de | 0.79 a |
| Media general | 11.2 | 784 | 16.8 | 32.5 | 534.6 | 201.4 | 159.5 | 0.8 |
| CV (%) | 5.1 | 1.7 | 11.3 | 8.7 | 14.7 | 4.96 | 4.93 | 2.98 |

Medias con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). CV= coeficiente de variación; RG= rendimiento de grano; PH= peso hectolitrico; NG= número de hileras; GH= granos por hilera; GM= granos por mazorca; PGM= peso de grano por mazorca; PM= peso de mazorca; IG= índice de grano.

De las ocho variables medidas se destaca el peso hectolítrico al exhibir granos muy densos en la mayoría de los genotipos que varía del orden de 771 (H-66) a 800 g L⁻¹ (ALBATROS). Estos valores superan al valor mínimo requerido tanto en la industria de harina para nixtamal (IHN) como la industria de masa para tortilla (IMT) que demandan granos con un PH mayor a 740 g h L⁻¹ (SE, 2002), incluso sobresalen con valores reportados por Vázquez *et al.* (2015); Virgen *et al.* (2016), lo que indica que los híbridos evaluados en este trabajo son aptos para la industria.

Con relación a número de hileras, granos por hilera y granos por mazorca se detectaron diferencias significativas para el factor de variación híbrido (Cuadro 5), evidenciando datos consistentes en las tres variables, lo que probablemente influyó en el rendimiento de grano tanto en los híbridos más sobresalientes (ATZIRI PUMA, TSIRI PUMA, H-50, H-66 y H-70) como en los híbridos menos productivos (H-49 AE, H-51 AE y H-53 AE) (Cuadro 3 y 5). El número de hileras, granos por hilera y granos por mazorca propiciaron valores del orden de 16-18; 30-34; 488-590, respectivamente (Cuadro 5).

Estos resultados anteriores superan datos reportados recientemente por López *et al.* (2017) al evaluar productividad de cruza simples de maíz con calidad de proteína en Valles Altos de México observando valores en promedio de 15 (número de hileras), 31 (granos por hilera) y 476 (granos por mazorca). Asimismo, superan lo reportado por Tadeo *et al.* (2016 b) y Canales *et al.* (2017), con híbridos de versión androestériles (AE) y fértiles (F). Estos resultados mostrados probablemente se deben a las condiciones climáticas favorables durante el ciclo agrícola, el manejo agronómico adecuado que consideró la fertilización oportuna en las etapas de demanda mayor de nutrimentos y la calidad genética de las semillas sembradas. De este modo, los rendimientos mayores de estos genotipos se asocian con el aumento de número hileras y de granos por hilera en la mazorca (Zamudio *et al.*, 2015).

Para las fuentes de variación ambiente e híbridos, mostraron diferencias significativas el peso de la mazorca y del grano de la mazorca (Cuadro 4 y 5). Para ambas variables destacan los híbridos ATZIRI PUMA, H-70 y H-50 con 217.7, 218.3 y 212.2 g de la mazorca, respectivamente, mientras que para peso de granos de la mazorca los promedios para los genotipos mencionados fueron 171, 168 y 173 g, respectivamente. Por lo tanto, se acredita que el peso de los granos de la mazorca influyó de manera directa en el rendimiento del grano. Los híbridos H-47 AE, H-49 AE, H-51 AE y H-53 AE presentaron valores inferiores respecto a los híbridos evaluados en peso de granos por mazorca; sin embargo, presentaron rendimientos superiores con relación a diversos trabajos mostrados en la literatura, estos incrementos en el rendimiento de las versiones androestériles atribuidas a modificaciones fisiológicas se asocia con la movilización de foto asimilados hacia el grano ante la ausencia de la demanda que representa la producción de granos de polen (Stamp *et al.*, 2000; Martínez *et al.*, 2005).

El índice de grano no presentó efecto significativo, el promedio fue de 0.80, es decir el 80% del peso total de una mazorca corresponde al grano, mientras que 20% es del olote. Esto indica que de manera general las mazorcas presentan una relación grano/olote de 8:2 en todos los genotipos, independientemente del ambiente y genotipo. Estos datos corroboran los reportados por Hernández y Esquivel (2004) y Pecina *et al.* (2011).

Conclusiones

Los híbridos de rendimiento mayor en este estudio fueron ATZIRI PUMA (12 t ha⁻¹) y TSIRI PUMA (11.8 t ha⁻¹) seguidos por los híbridos H-50, H-66 y H-70, que produjeron 11.5, 11.6 y 11.6 t ha⁻¹ respectivamente. Considerando que H-50 es uno de los híbridos de mayor uso comercial en los Valles Altos, los cuatro híbridos referidos de mayor rendimiento de grano blanco, podrían tener perspectivas de uso comercial, en los ambientes manejados en este estudio.

El rendimiento de grano en los híbridos en su versión androestéril presentó respuestas similares o superiores en su versión fértil por ambiente específico, ratificando los rendimientos esperados de estos materiales isogénicos. Los híbridos evaluados presentaron rendimientos superiores al testigo comercial H-50 y al promedio de la región, lo cual es una alternativa para las empresas productoras de semillas y benéfico para que los agricultores tengan acceso de semillas mejoradas con ventajas agronómicas y económicas mayores para la producción de granos en Valles Altos de México.

Las interacciones positivas de ambientes × híbridos observadas en este trabajo, muestra la respuesta diferencial de cada híbrido en los ambientes de producción, esto implica necesariamente incrementar el número de ambientes específicos de evaluación de los genotipos con el manejo agronómico apropiado considerando el factor suelo-agua, y otros factores controlables.

Literatura citada

- Arellano, V. J. L.; Virgen, V. J.; Rojas, M. I. y Ávila, P. M. A. 2011. H-70: híbrido de maíz de alto rendimiento para temporal y riego del Altiplano Central de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2(4):619-626.
- Canales, I. E. I.; Tadeo, R. M.; Mejía, C. J. A.; García, Z. J. J. y Espinosa, C. A. 2017. Semilla fértil y androestéril de maíz bajo diferentes densidades de población. *Ecosist. Recur. Agropec.* 12(4):465-473.
- Espinosa, C. A.; Tadeo, R. M.; Zamudio, G. B.; Virgen, V. J.; Turrent, F. A.; Rojas, M. I.; Gómez, M. N. O.; Sierra, M. M.; López, L. C.; Palafox, C. A.; Vázquez, C. G.; Rodríguez, M. F.; Canales, I. E.; Zaragoza, E. J.; Martínez, Y. B.; Valdivia, B. R.; Cárdenas, M. A.; Mora, G. K. y Martínez, N. B. 2018. H-47 AE, híbrido de maíz para Valles Altos de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 1(41):87-89.
- Espinosa, C. A.; Tadeo, R. M.; Gómez, M. N.; Sierra M., M.; Martínez, M. R.; Virgen, V. J.; Palafox, C. A.; Caballero, H. F.; Arteaga, E. I.; Canales, I. E. I.; Vázquez, C. G. y Salinas, M. Y. 2010. H-47 AE híbrido de maíz con esterilidad masculina para producción de semilla en Valles Altos. *In: Día de Campo: CEVAMEX 2010.* Chapingo, México. Memoria técnica núm. 11. 15-16 pp.
- Espinosa, C. A.; Tadeo, R. M.; Gómez, M. N.; Sierra, M. M.; Martínez, M. R.; Virgen, V. J.; Palafox, C. A.; Caballero, H. F.; Vázquez, C. G. y Salinas, M. Y. 2008b. H-49 AE híbrido de maíz para Valles Altos con androestérilidad para producción de semilla. *In: Día de Campo CEVAMEX.* Chapingo, Estado de México. Memoria técnica núm. 9. 13-14 pp.
- Espinosa, C. A.; Tadeo, R. M.; Sierra, M. M.; Turrent, F. A.; Valdivia, B. R. y Zamudio, G. B. 2009. Rendimiento de híbridos de maíz bajo diferentes combinaciones de semilla androestéril y fértil en México. *Agron. Mesoam.* 20(2):211:216.

- Espinosa, C. A.; Tadeo, R. M.; Turrent, F. A.; Gómez, M. N.; Sierra, M. M.; Palafox, C. A.; Caballero, H. F.; Valdivia, B. R. y Rodríguez, M. F. A. 2008a. El potencial de las variedades nativas y mejoradas de maíz. *Ciencias*. 92(93):118-125.
- Espinosa, C. A. y Tadeo, R. M. 2018. Importación record de maíz afrenta para México. *La Jornada*. 25 de febrero de 2018: <http://www.jornada.unam.mx/2018/02/25/opinion/021a1eco>.
- Espinosa, C. A.; Tadeo, R. M.; Virgen, V. J.; Rojas, M. I.; Gómez, M. N. O.; Sierra M. M.; Palafox, C. A.; Vázquez, C. G.; Rodríguez, M. F. A.; Zamudio, G. B.; Arteaga, E. I.; Canales, I. E.; Martínez, Y. B. y Valdivia, B. R. 2012. H-51 AE, híbrido de maíz para áreas de humedad residual, buen temporal y riego en Valles Altos del Centro de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 35(4):347-349.
- Espinosa, C. A.; Tadeo, R. M.; Lothrop, J.; Azpiroz, R. S.; Martínez, M. R. y Pérez, C. J. P. 2003. H-48, nuevo híbrido de maíz de temporal para los Valles Altos del centro de México. *Agríc. Téc. Méx.* 29(1):85-87.
- Hernández, C. J. M. y Esquivel, E. G. 2004. Rendimiento de grano y características agronómicas en germoplasma de maíz de Valles Altos de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 27(1):27-31.
- López, L. C.; Tadeo, R. M.; Espinosa, C. A.; García, Z. J.; Benítez, R. I.; Vázquez, C. M. y Carrillo, S. J. 2017. Productividad de cruza simples de maíz con calidad de proteína en Valles Altos de México. *México. Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 8(3):559-570.
- Lozano, R. A.; Santacruz, V. A.; San Vicente, G. F.; Crossa, J.; Burgueño, J. y Molina, G. J. D. 2015. Modelación de la interacción genotipo x ambiente en rendimiento de híbridos de maíz blanco en ambientes múltiples. *Rev. Fitotec. Mex.* 38(4):337-347.
- María, R. A.; Rojas, M. I.; Ávila, P. M. A. y Gámez, V. J. A. 2003. Producción de Maíz de Temporal en el Estado de Tlaxcala. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)- Campo Experimental Tlaxcala. Tlaxcala. México. Folleto para productores núm. 3. 16 p.
- Márquez, S. F. 1991. *Genotecnia vegetal: métodos, teoría, resultados*. AGT Editor. México. 500 p.
- Martínez, L. C.; Mendoza, O. L. E.; García, D. L. S. G.; Mendoza, C. M. C. y Martínez, G. A. 2005. Producción de semilla híbrida de maíz con líneas androfértiles y androestéres isogénicas y su respuesta a la fertilización y densidad de población. *Rev. Fitotec. Mex.* 28(2):127-133.
- Pecina, M. A.; Mendoza, C. M. C.; López, S. J. A.; Castillo, G. F.; Mendoza, R. M. y Ortiz, C. J. 2011. Rendimiento de grano y sus componentes en maíces nativos de Tamaulipas evaluados en ambientes contrastantes. *Rev. Fitotec. Mex.* 34(2):85-92.
- Ramírez, L. 2006. Utilización de la androesterilidad para la producción de semilla híbrida. Cátedra de producción vegetal genética y mejora vegetal. Departamento de producción agraria. Universidad Pública de Navarra, España. 7 p.
- Reyes, M. C.; Cantú, A. M.; Gill, L. H.; García, O. J. y Mayek, P. N. 2017. Interacción genotipo x ambiente en maíz cultivado en Tamaulipas. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 8(3):571-582.
- SE. 2002. Secretaría de Economía. NMX-FF-034/1-SCFI-2002. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano -Cereales-Parte I: Maíz blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado-especificaciones y métodos de prueba. Dirección General de Normas. México, DF. 18 p.
- SIAP-SAGARPA. 2016. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Información Básica. www.siap.sagarpa.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=10&Itemid=15.

- Stamp, P.; Chowchong, S.; Menzi, M.; Weingartner, U. and Kaeser, O. 2000. Increase in the yield of cytoplasmic male sterile maize revisited. *Crop Sci.* 40(6):1586-1587.
- Tadeo, R. M.; Espinosa, C. A.; Beck, L. D. y Torres, J. L. 2007. Rendimiento de semilla de cruza simples fértiles y androestériles progenitoras de híbridos de maíz. *Agric. Téc. Méx.* 33 (2):175-180.
- Tadeo, R. M.; Espinosa, C. A.; García, Z. J. J.; Lobato, O. R.; Gómez, M. N.; Sierra, M. M. y Valdivia, B. R. 2015. Productividad de híbridos androestériles y fértiles de maíz en cuatro ambientes de evaluación. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6(8):1857-1866.
- Tadeo, R. M.; Espinosa, C. A.; Serrano, R. J.; Sierra, M. M.; Caballero, H. F.; Valdivia, B. R.; Gómez, M. N.; Palafox, C. A.; Rodríguez, M. F. A. y Zamudio, G. B. 2010. Productividad de diferentes combinaciones de semilla androestéril y fértil en dos híbridos de maíz. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 1(3):273-287.
- Tadeo, R. M.; Espinosa, C. A.; Turrent, F. A.; Zamudio, G. B.; Sierra, M. M.; Gómez, M. N.; Valdivia, B. R. y Virgen, V. J. 2014 b. Rendimiento de híbridos androestériles y fértiles de maíz en dos localidades en Valles Altos de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 5(5):883-891.
- Tadeo, R. M.; Espinosa, C. A.; Trejo, P. V.; Arteaga, E. I.; Canales, I. E.; Turrent, F. A.; Sierra, M. M.; Valdivia, B. R.; Gómez, M. N. O.; Palafox, C. A. y Zamudio, G. B. 2013. Eliminación de espiga y hojas en progenitores androestériles y fértiles de los híbridos trilineales de maíz 'H-47' y 'H-49'. *Rev. Fitotec. Mex.* 36(3): 245-250.
- Tadeo, R. M.; Espinosa, C. A.; García, Z. J. J.; Lobato, O. R.; Gómez, M. N. O.; Sierra M. M.; Valdivia, B. R.; Zamudio, G. B.; Martínez, Y. B.; López, L. C.; Mora, G. K. Y.; Canales, I. E. I.; Cárdenas, M. A. L.; Zaragoza, E. J. y Alcántar, L. H. J. 2016a. Tsiri Puma, híbrido de maíz para Valles Altos con esquema de androesterilidad para producción de semillas. *Rev. Fitotec. Mex.* 39(3):331-333.
- Tadeo, R. M.; Espinosa, C. A.; Turrent, F. A.; Zamudio, G. B.; Valdivia, B. R. y Andrés, M. P. 2014a. Productividad de grano de cuatro híbridos trilineales de maíz en versión androesteril y fértil. *Agron. Mesoam.* 25(1):45-52.
- Tadeo, R. M.; Zaragoza, E. J.; Espinosa, C. A.; Turrent, F. A.; Zamudio, G. B.; Virgen, V. J.; Mora, G. K. Y. y Valdivia, B. R. 2016b. Productividad de la generación F1 y F2 de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) de Valles Altos de México. *Agrociencia.* 50(1):33-41.
- Turrent, F. A. 2009. Potencial productivo de maíz. *Rev. Cienc.* 92(93):126-129.
- Vázquez, C. M. G.; Arellano, V. J. L. y Santiago, R. D. 2015. Rendimiento y calidad de grano y tortilla de maíces híbridos de Valles Altos de México crecidos en riego y temporal. *Rev. Fitotec. Mex.* 38(1):229-237.
- Virgen, V. J.; Zepeda, B. R.; Ávila, P. M. A.; Espinosa, C. A.; Arellano, V. J. L. y Gámez, V. A. 2016. Producción y calidad de semillas de maíz en Valles Altos de México. *Agron. Mesoam.* 27(1):191-206.
- Zamudio, G. B.; Tadeo, R. M.; Espinosa, C. A.; Martínez, R. J. N.; Celis, E. D. I. y Valdivia, B. R. 2015. Eficiencia agronómica de fertilización al suelo de macr o nutrimentos en híbridos de maíz. México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6(7):1557-1569.