

INTEGRACIÓN DE SINTÉTICOS CON LÍNEAS DE MAÍZ CONVERTIDAS AL CARÁCTER DE ALTA CALIDAD DE PROTEÍNA

Pablo Andrés-Meza, Mauro Sierra-Macías, José Apolinar Mejía-Contreras, José Domingo Molina-Galán, Alejandro Espinosa-Calderón, Noel Orlando Gómez-Montiel, María Gricelda Vázquez-Carrillo, Otto Raúl Leyva-Ovalle, Margarita Tadeo-Robledo y Miguel Cebada-Merino

RESUMEN

El cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en la mayoría de la tierra agrícola en México es de tipo tradicional o de subsistencia. En tales condiciones, las variedades sintéticas (VS) podrían jugar un papel importante. El objetivo fue integrar 11 sintéticos de maíz a partir de líneas convertidas al carácter de alta calidad de proteína (ACP) y observar el efecto sobre el rendimiento de grano en función del número de líneas involucradas. A partir de un cruzamiento dialélico se desarrollaron dos grupos de sintéticos. Los compuestos se integraron con diferente número de semillas de cada una de las cruces posibles. El análisis de varianza combinado para rendimiento de grano reveló significancia ($P < 0,01$) entre variedades (V), ambientes (A) y la interacción $V \times A$ en los dos

grupos evaluados. Dentro del Grupo 1, el sintético 4C de 12 líneas, superó en 9 y 25% a las variedades testigo VS-536 y V-537C de endospermo normal y ACP, respectivamente. En el Grupo 2, los sintéticos 9C y 10C de seis y ocho líneas igualaron al mejor testigo (VS-536) y superaron en 27% a la variedad V-537C de ACP. Aunque los resultados no fueron consistentes entre grupos por la fuerte variación ambiental, los sintéticos de 8 a 12 líneas sería la mejor alternativa. La ecuación empírica de Wright predijo una curva asintótica para F_1 y F_2 hacia VS-536, usada como referencia. El rendimiento de los sintéticos F_2 incrementa al aumentar el número de líneas hasta un máximo de $n = 9$ y un rendimiento calculado de $5,11t \cdot ha^{-1}$.

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo más importante en el mundo en términos de producción total; en 2014, a nivel mundial se produjeron 1.007.473 toneladas métricas, con un rendimiento promedio de $5,1t \cdot ha^{-1}$ (FAOSTAT, 2016). El rendimiento en la producción de maíz en México es generalmente bajo, debido a que se cultiva bajo condiciones donde el estrés biótico y abiótico son comunes y limitan su producción (Turrent *et al.*, 2012).

Las variedades de polinización libre (VPL) son un elemento clave entre las prácticas usadas por los agricultores en los diferentes sistemas de producción. Su importancia recae en la facilidad para mantener y guardar semilla para el siguiente ciclo de siembra (Donnett *et al.*, 2012); no obstante, el escaso uso de semilla mejorada ha sido uno de los factores determinantes de la productividad de maíz en México. Solo un 30% de la superficie total se siembra con maíces mejorados (híbridos y variedades de polini-

zación libre), y corresponde a tierras de la mejor calidad, bajo riego y buen temporal (Turrent *et al.*, 2012); el resto de las tierras son generalmente caracterizadas por precipitaciones bajas y erráticas que resultan en un bajo potencial agrícola.

Aunque la tendencia al uso de maíces mejorados ha sido gradual durante los últimos años, es necesario generar VPL para productores de bajos ingresos. Bajo este contexto se originan las variedades sintéticas (VS), las cuales pueden definirse como la gene-

ración avanzada de un híbrido múltiple y subsecuentemente mantenidas por selección masal en campos aislados (Lonnquist, 1961; Hallauer y Miranda, 1988).

Las VS pueden ser usadas por los agricultores para la producción comercial de grano o por los mejoradores como poblaciones base para derivar nuevas líneas (Sahagún *et al.*, 2013). En la mayoría de los países en desarrollo, los agricultores prefieren sembrar VS en lugar de híbridos, debido a la facilidad para desarrollar, mantener y producir

PALABRAS CLAVE / Alta Calidad de Proteína / Fórmula de Wright / Número Óptimo de Líneas / Rendimiento de Sintéticos / *Zea mays* L. /

Recibido: 25/08/2016. Modificado: 06/09/2018. Aceptado: 10/09/2018.

Pablo Andrés-Meza. Doctor en Genética, Colegio de Postgraduados (COLPOS), México.

Mauro Sierra-Macías (Autor de correspondencia). Doctor en Ciencias Agrícolas y Forestales, Universidad de Colima, México. Investigador, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), México. Address: Campo Experimental

Cotaxtla, INIFAP. 92277. Medellín de Bravo, Veracruz, Mexico. e-mail: sierra.mauro@inifap.gob.mx

José Apolinar Mejía-Contreras. Ph.D. en Agronomía, Nebraska University, EEUU. Profesor, COLPOS, México.

José Domingo Molina-Galán. Ph.D en Genética, North Carolina State University, EEUU. Profesor, COLPOS, Mexico.

Alejandro Espinosa-Calderón. Doctor en Genética, COLPOS, México. Investigador, INIFAP, México.

Noel Orlando Gómez-Montiel. Doctor en Genética, COLPOS, México. Investigador, INIFAP, México.

María Gricelda Vázquez-Carrillo. Doctora en Genética, COLPOS, México. Investigadora, INIFAP, Mexico.

Otto Raúl Leyva-Ovalle. Doctor en Genética, COLPOS, México. Profesora, Universidad Veracruzana, México.

Margarita Tadeo-Robledo. Doctora en Genética, COLPOS, México. Profesora, Universidad Nacional Autónoma de México.

Miguel Cebada-Merino. M.C. en Horticultura Tropical, UV, Mexico. Profesor, Universidad Veracruzana, México.

INTEGRATION WITH SYNTHETIC CORN LINES CONVERTED TO THE CHARACTER OF HIGH QUALITY PROTEIN

Pablo Andrés-Meza, Mauro Sierra-Macías, José Apolinar Mejía-Contreras, José Domingo Molina-Galán, Alejandro Espinosa-Calderón, Noel Orlando Gómez-Montiel, María Gricelda Vázquez-Carrillo, Otto Raúl Leyva-Ovalle, Margarita Tadeo-Robledo and Miguel Cebada-Merino

SUMMARY

Corn (*Zea mays L.*) growing in most of the agricultural land in Mexico is of the traditional or subsistence type. Under such conditions, synthetic varieties (SV) could play a significant role. The aim of this study was to integrate 11 synthetic corn varieties converted to the character of high quality protein (HQP) lines, and to observe the effect of the number of lines involved on grain yield. Starting from a diallel crossing, two groups of synthetics were developed. The composites were integrated with different numbers of seeds from each of the possible crosses. Combined variance analysis for grain yield revealed significant differences ($P \leq 0.01$) between varieties (V), environments (E) and interaction ($V \times E$), in both assessed

groups. In Group 1, synthetic 4C consisting of 12 lines exceeded 9 and 25% the control varieties VS-536 and V-537C of normal endosperm and HQP, respectively. In Group 2, synthetics 9C and 10C with six and eight lines equaled the best control (VS-536) and exceeded by 27% the V-537C variety of HQP. Although the results were not consistent between groups due to the strong environmental variation, synthetics with 8 to 12 lines appears to be the best alternative. Wright empirical equation predicted an asymptotic curve for F_1 and F_2 towards VS-536, used as reference. The yield of the F_2 synthetic increases with the number of lines to a maximum value $n = 9$, with a calculated yield of $5.11 t \cdot ha^{-1}$.

INTEGRAÇÃO DE SINTÉTICOS COM LINHAS DE MILHO CONVERTIDAS AO CARÁTER DE ALTA QUALIDADE DE PROTEÍNA

Pablo Andrés-Meza, Mauro Sierra-Macías, José Apolinar Mejía-Contreras, José Domingo Molina-Galán, Alejandro Espinosa-Calderón, Noel Orlando Gómez-Montiel, María Gricelda Vázquez-Carrillo, Otto Raúl Leyva-Ovalle, Margarita Tadeo-Robledo e Miguel Cebada-Merino

RESUMO

O cultivo de milho (*Zea mays L.*) na maioria da terra agrícola no México é do tipo tradicional ou de subsistência. Em tais condições, as variedades sintéticas (VS) podem desempenhar um papel importante. O objetivo foi integrar 11 sintéticos de milho a partir de linhas convertidas ao caráter de alta qualidade de proteína (AQP) e observar o efeito sobre o rendimento de grão em função do número de linhas envolvidas. A partir de um cruzamento dialélico se desenvolvem dois grupos de sintéticos. Os compostos se integraram com diferente número de sementes de cada um dos cruzamentos possíveis. A análise de variação combinada para rendimento de grão revelou significância ($P < 0,01$) entre variedades (V), ambientes (A) e a interação $V \times A$ nos dois

grupos avaliados. Dentro de Grupo 1, o sintético 4C de 12 linhas, superou em 9% e 25% as variedades testemunho VS-536 e V-537C de endosperma normal e AQP, respectivamente. No Grupo 2, os sintéticos 9C e 10C de seis e oito linhas igualaram o melhor testemunho (VS-536) e superaram em 27% a variedade V-537C de AQP. Ainda que os resultados não foram consistentes entre grupos devido à forte variação ambiental, os sintéticos de 8 a 12 linhas devem ser a melhor alternativa. A equação empírica de Wright previu uma curva assintótica de e na direção de VS-536, usada como referência. O rendimento dos sintéticos incrementa ao aumentar o número de linhas até um máximo de $n = 9$ e um rendimento calculado de $5,11 t \cdot ha^{-1}$.

grandes cantidades de semilla (CIMMYT, 1999; Kutka y Smith, 2007), además de que presentan buena adaptación a las condiciones ecológicas del lugar de origen.

En la década de 1950, la introducción de VS fue llevada a cabo principalmente por el Instituto de Investigaciones Agrícolas (IIA), actualmente Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Diversas variedades nativas sobresalientes fueron autofecundadas en un intento por desarrollar líneas endogámicas útiles para generar VS (Márquez, 2008).

La más popular en el trópico húmedo es VS-536, obtenida mediante la recombinación genética de nueve líneas endogámicas provenientes de los programas de maíz de Cotaxtla, Veracruz, Iguala, Guerrero, Rio Bravo, Tamaulipas, y Ocotlán, Jalisco (Sierra *et al.*, 1992), considerada como una excelente fuente para derivar líneas con alta aptitud combinatoria general (ACG).

La ACG es usada para designar el comportamiento promedio de una línea en combinaciones híbridas (Dhilwayo *et al.*, 2009). Narro *et al.* (2012) mencionan que seleccionar

líneas basadas en su ACG, a menudo tiene un efecto limitado. En este sentido, mientras que la aptitud combinatoria específica (ACE) es más importante para obtener máximos rendimientos en cruza híbridas, la ACG es usada en el desarrollo de sintéticos de alto rendimiento (Kutka, 2005; Muntean *et al.*, 2012).

Un modelo clásico para el desarrollo de sintéticos fue elaborado por Wright (1922) con líneas de cuyos (*Cavia porcellus L.*) y publicado por primera vez por Kinman y Sprague (1945). Estos autores apuntaron que el comportamiento de

generaciones avanzadas de VS dependía del número de progenitores (n), del comportamiento promedio de los mismos progenitores (\bar{P}), del comportamiento promedio de todas las combinaciones híbridas posibles entre los progenitores (F_1 , equivalente a la ACG), y de la cantidad de endogamia presente.

Debido a que el número de combinaciones posibles entre n líneas es enorme, la ecuación de Wright es útil para predecir el rendimiento de VS. Diferentes estudios (Kinman y Sprague, 1945; Ortíz, 1961; Bernardo, 2000; Sahagún *et al.*, 2005; Sahagún *et al.*, 2013) han

utilizado la fórmula de Wright, concerniente al rendimiento de las generaciones F_1 y F_2 ; sin embargo, existe poca información acerca del número óptimo de líneas para la formación de VS con alto rendimiento.

Recientemente Kutka y Smith (2007) realizaron un análisis sobre el número de líneas usadas para obtener sintéticos o compuestos de alto rendimiento y sugieren que, en promedio, de cinco a ocho líneas se obtienen altos rendimientos; apuntan que con 10 líneas, se retiene el 90% de heterosis en la F_2 , e incluso con 20 líneas se retiene cerca del 95% de heterosis. Sin embargo, concluyen que el potencial de estos sintéticos no ha sido completamente examinado, aunque sus rendimientos son superiores a las variedades actuales. En este contexto, el objetivo del presente trabajo de investigación fue: 1) integrar 11 sintéticos de maíz a partir de líneas convertidas al carácter de alta calidad de proteína (ACP), previamente seleccionadas por su efectos de ACG y comportamiento *per se*, y 2) observar el efecto sobre el rendimiento de grano en función del número de líneas involucradas.

Materiales y Métodos

Proceso de conversión y selección de las líneas

En un intento por mejorar la calidad proteínica de las líneas del germoplasma elite del Programa de Mejoramiento Genético de Maíz del Campo Experimental Cotaxtla (CECot) del INIFAP, en el año 2000 se inició la conversión al carácter de ACP de las líneas de maíz de endospermo normal LT-154, LT-155, CABG, LRB14 y D539. Estas líneas fueron cruzadas con la línea CML-144, y la VS-536 fue cruzada con V-537C, ambas donadoras del carácter o2. La líneas se autofecundaron y se seleccionaron sublíneas, que fueron retrocruzadas y autofecundadas por dos ocasiones (RC_2). Asimismo, se obtuvieron líneas recicladas de la V-537C, primera variedad de maíz con ACP

para el trópico mexicano (Sierra *et al.*, 2001).

Durante el proceso de selección de líneas, adicional a la evaluación de las variables agronómicas, al momento de la cosecha se dio una calificación de la segregación de granos o2, como indicador de la presencia del carácter. Finalmente, durante el ciclo otoño-invierno 2007/08 se evaluó y seleccionó un grupo de líneas sobresalientes, las cuales presentaron buenas características agronómicas, arquetípicas y alta frecuencia del carácter o2. En este mismo ciclo, y en un lote aislado, se formó un cruzamiento dialélico usando las mejores líneas seleccionadas, donde un mínimo de cinco plantas fueron usadas para generar cada cruce F_1 . Las cruces y sus progenitores fueron evaluados durante el ciclo primavera-verano 2008 (Andrés-Meza *et al.*, 2011) y con los resultados obtenidos se procedió a formar sintéticos F_2 .

Formación de sintéticos y evaluación en campo

Los compuestos se integraron tomando diferente número de semillas de cada una de las cruces posibles (Tabla I). Estos compuestos balanceados dieron origen al sintético F_1 de cada uno de los sintéticos integrados. Los compuestos se sembraron durante el ciclo otoño-invierno

2008/09, y mediante cruces fraternales se realizó la recombinación. En la cosecha, se tomaron todas las mazorcas dentro de cada sintético, obteniéndose siete sintéticos F_2 (Grupo 1). Otro grupo de cuatro sintéticos fueron integrados durante el ciclo otoño-invierno 2011/12 (Grupo 2), siguiendo la metodología descrita.

Fórmula de predicción de Wright

Se utilizó la fórmula de Wright (1922) con la finalidad de predecir el rendimiento de grano de sintéticos F_2 y demostrar la propuesta de Márquez (1979), quien sugiere usar al sintético F_1 de máximo rendimiento dentro de cada grupo, con la intención de dar lugar al sintético F_2 de máximo rendimiento. La ecuación de Wright, $F_2 = F_1 - (F_1 - \bar{P}) / n$, donde F_2 : rendimiento esperado en la generación F_2 del sintético o compuesto, F_1 : rendimiento promedio de los cruzamientos posibles entre n líneas, y \bar{P} : rendimiento promedio de las líneas como tales. La gráfica de predicción se realizó a partir de los rendimientos de las cruces simples (CS) F_1 (datos no mostrados) (Andrés-Meza *et al.*, 2011).

Análisis estadístico

Con datos del ciclo agrícola primavera-verano 2009 se eva-

luó el primer grupo de sintéticos más cinco testigos, y se sembraron en diferentes años y localidades bajo un diseño de bloques completamente al azar con dos repeticiones. Mientras que para el ciclo agrícola primavera-verano 2012 se incluyó el segundo grupo de sintéticos al ensayo regional, con un total de 16 genotipos. A partir de este último año el ensayo fue sembrado en diferentes localidades de Veracruz y Guerrero, bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones.

Para observar el comportamiento de los sintéticos y el efecto del número de líneas sobre el rendimiento de grano, se realizó un análisis combinado para las localidades de prueba. La comparación de medias se realizaron con la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). Todos los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico SAS/STAT® vers. 9.0 (SAS, 1990).

Resultados y Discusión

Análisis de varianza combinado

El análisis de varianza combinado para rendimiento de grano reveló significancia ($P < 0,01$) entre variedades (V), ambientes (A) y su interacción (VxA), en los dos grupos evaluados (Tabla II), lo que indica la presencia de diversidad

TABLA I
NÚMERO DE LÍNEAS Y CANTIDAD DE SEMILLA QUE CONSTITUYEN EL COMPUESTO BALANCEADO DE CADA UNO DE LOS SINTÉTICOS

Nº	Genealogía	Líneas*	Semillas*
1	Sintético-1C	20	10
2	Sintético-2C	11	15
3	Sintético-3C	9	20
4	Sintético-4C	12	15
5	Sintético-5C	12	15
6	Sintético-6C	9	20
7	Sintético-7C	8	25
8	Sintético-8C	6	15
9	Sintético-9C	6	20
10	Sintético-10C	8	15
11	Sintético-11C	8	20

* Número de líneas y semillas que integran a cada sintético, respectivamente.

TABLA II
ANÁLISIS DE VARIANZA COMBINADO PARA RENDIMIENTO DE GRANO EN VERACRUZ, MÉXICO

Fuente de variación	Grupo 1		Grupo 2	
	GL	CM	GL	CM
Ambientes (A)	7	29,29**	6	58,14**
Variedades (V)	11	1,47**	15	2,20**
Interacción (VxA)	77	0,90**	90	0,78**
Error	95	0,49	210	0,48
CV (%)	15,4	-	19,4	-
Promedio	4,55	-	3,58	-

*, ** Significativo ($P \leq 0,05$; $P \leq 0,01$) y no significativo, respectivamente; GL: grados de libertad; CM: cuadrados medios; CV: coeficiente de variación. El Grupo 1 incluye la evaluación de 12 sintéticos a través de ocho ambientes, y el Grupo 2 incluye 16 sintéticos a través de siete ambientes.

genética en los sintéticos evaluados (Márquez, 2007). La mayor varianza se registró para ambientes, infiriendo condiciones heterogéneas asociadas a precipitación y condiciones edáficas, principalmente. Existe suficiente variabilidad genética para seleccionar materiales con los que se puede iniciar un programa de mejoramiento genético o para su aprovechamiento por parte de los productores, e incrementar significativamente la producción.

Diversidad entre sintéticos

Dentro del Grupo 1, el sintético-4C fue estadísticamente superior al resto de las variedades evaluadas (Tabla III); éste superó en 9 y 25% a la variedad testigo VS-536 y V-537C de endospermo normal y ACP, respectivamente. Resultados similares fueron informados por Sierra *et al.* (2002) en variedades de maíz normal y con ACP para zonas tropicales de México y por Melesio *et al.* (2008) en híbridos de maíz de ACP para el Bajío. Este resultado indica que se ha logrado corregir el efecto pleiotrópico que se liga a maíces con el gen *o2*. Por otra parte, aunque con un rendimiento inferior, otro grupo de sintéticos (3C, 5C, 6C, LPSC3

y 3SEQ) fueron estadísticamente similares a la variedad VS-536. Los dos últimos de este grupo, de endospermo normal, son genotipos seleccionados para tolerancia a sequía.

Dentro del Grupo 2, el comportamiento de los sintéticos no fue consistente a través de los ambientes de prueba, sugiriendo que la mayor variación fue debida al azar. De acuerdo a la prueba de Tukey, solo los sintéticos 9C, 10C y 11C lograron igualar estadísticamente al mejor testigo VS-536 (Tabla III); asimismo, estos sintéticos superaron en 27% a la mejor variedad V-537C de ACP. Estudios previos, han reportado rendimientos de cultivos de ACP competitivos con relación al mejor cultivar de endospermo normal (Vergara *et al.*, 2000). Mertz (1992) ha documentado rendimientos similares entre materiales de ACP y de endospermo normal; es decir, estos maíces presentan genes modificadores que le confieren calidad al grano y dureza en el endospermo, similar a un maíz con endospermo normal.

Los resultados permiten seleccionar variedades con un alto potencial productivo para su liberación con productores y servir como fuente de germoplasma para ampliar la base

genética dentro de un programa de mejoramiento genético.

Efecto del número de líneas

El rendimiento de grano del sintético 4C, integrado con 12 líneas, fue estadísticamente superior a todas las demás variedades (Figura 1). Se aprecia que el mayor abatimiento endogámico se encontró en el sintético 5C, lo cual puede deberse a que en su integración participaron líneas de bajo rendimiento y con bajos efectos de ACG (Andrés-Meza, 2010). Por otra parte, los sintéticos 3C y 6C, ambos integrados con nueve líneas, presentaron rendimientos estadísticamente similares al testigo VS-536; es decir, no existió diferencia alguna en cuanto a la cantidad de líneas componentes de cada genotipo. Algo similar se encontró en los sintéticos 1C, 2C y 7C, de 20, 11 y 8 líneas respectivamente.

A diferencia del sintético 5C, integrado con 12 líneas, se observa que los mayores rendimientos se obtuvieron con los sintéticos formados con 8, 11 y 12 líneas, y que éste llega a un máximo (12 líneas) y decrece conforme se integran más líneas (20 líneas). Kutka y Smith (2007) sugieren de 5 a 12 líneas y posiblemente más, para formar sintéticos de alto rendimiento. Sin embargo, se debe prestar especial atención al grado de endogamia de las líneas involucradas (Márquez, 2014b). Holland (2001), mencio-

na que en el rendimiento de los sintéticos F₂ influyen dos fenómenos: endogamia y heterosis. En este sentido, la depresión endogámica o abatimiento endogámico se puede evitar usando líneas con pocas autofecundaciones y aumentando el número de líneas (Márquez, 2014a). No obstante, este último aumento no puede hacerse indefinidamente, ya que se lograría llegar al rendimiento de la variedad original (Márquez, 2010).

En la Figura 2 se muestra la tendencia de rendimiento del segundo grupo de sintéticos. Aunque obtuvo 12% menos de rendimiento, se encontró que el mejor comportamiento fue para el testigo VS-536 de endospermo normal, integrado con nueve líneas. Tres sintéticos: 9C, 10C y 11C de ACP resultaron estadísticamente similares al testigo, y sus rendimientos representan el 97% de éste. A excepción del sintético 8C, no hubo diferencias entre los sintéticos formados con seis y ocho líneas; de igual forma sucedió para los sintéticos integrados con 12 líneas.

Por otro lado, el rendimiento del sintético 4C fue 21% menor que el promedio registrado en el primer grupo. La inconsistencia de los sintéticos a través de los ambientes quizás se deba a que durante la selección de líneas, ésta se realizó en una sola estación de prueba, por lo que seguramente se seleccionaron

TABLA III
MEDIAS DE RENDIMIENTO DE DOS GRUPOS
DE SINTÉTICOS A TRAVÉS DE AMBIENTES

Variedades	Rendimiento de grano (t·ha ⁻¹)			
	Grupo 1†	% Rel.	Grupo 2	% Rel.
1C	4,75 ab*	104,2	3,48 abc	85,3
2C	4,91 ab	107,7	3,43 abc	84,1
3C	4,59 abc	100,7	3,83 ab	93,9
4C	4,98 a	109,2	3,62 abc	88,7
5C	4,32 abc	94,7	3,44 abc	84,3
6C	4,66 abc	102,2	3,52 abc	86,3
7C	4,86 ab	106,6	3,60 abc	88,2
8C	-	-	3,77 ab	92,4
9C	-	-	3,96 a	97,1
10C	-	-	3,95 a	96,8
11C	-	-	3,94 a	96,6
TS6	4,20 bc	92,1	3,35 abc	82,1
LPSC3	4,51 abc	98,9	3,01 c	73,8
VS-536	4,56 abc	100,0	4,08 a	100,0
V-537C	3,99 c	87,5	3,11 bc	76,2
3SEQ	4,35 abc	95,4	3,18 bc	77,9
Promedio	4,55		3,58	

Letras minúsculas iguales en cada columna son estadísticamente iguales, de acuerdo con Tukey (0,05); % Rel: porcentaje sobre la variedad original. El Grupo 1 incluye la evaluación de 12 sintéticos a través de ocho ambientes, y el Grupo 2 incluye 16 sintéticos a través de siete ambientes.

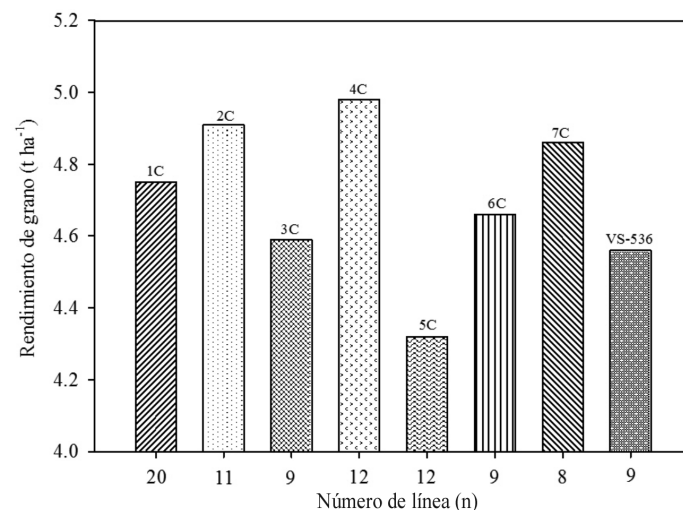


Figura 1. Grupo 1: rendimientos reales de sintéticos F₂ obtenidos con diferente número de líneas.

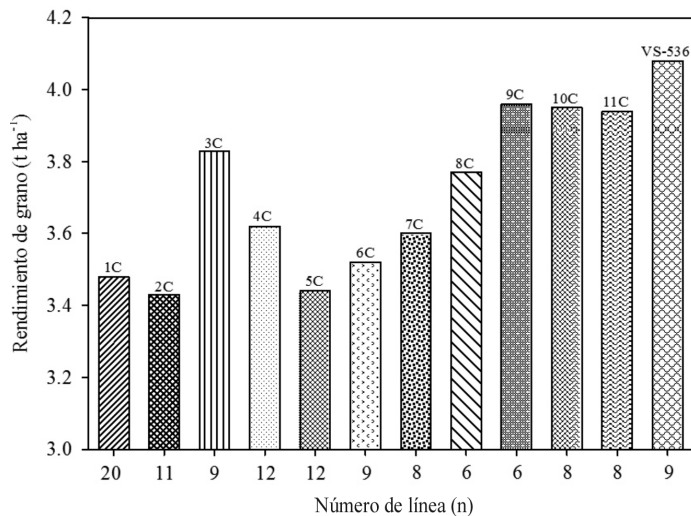


Figura 2. Grupo 2: rendimientos reales de sintéticos F₂ obtenidos con diferente número de líneas.

líneas para adaptación específica (Aung *et al.*, 2016). Por ello, las líneas que forman parte de estos sintéticos interactúan fuertemente en los ambientes en los que son evaluados.

La presencia de una fuerte interacción de las líneas, la cual se expresa por los sintéticos que constituyeron, se debe a desviaciones del modelo genético aditivo *inter-loci*, en que está basada la fórmula de Wright. De acuerdo con Márquez (2014a), al integrar una línea a un grupo de n líneas que ya constituyen un sintético (n+1), por efecto de la recombinación genética al pasar de la F₁ a la F₂ se presentan combinaciones genotípicas que pueden desviarse del modelo aditivo y dar lugar a genotipos diferentes. Sahagún *et al.* (2013) mencionan que el rendimiento de los sintéticos también dependerá fundamentalmente de la cantidad de desequilibrio de ligamiento que existe. Escalante *et al.* (2013) sugieren usar 3 o 4 generaciones de apareamiento aleatorio para disminuir tal desequilibrio, así como un gran número de plantas (150 a 200) durante la recombinación (Márquez, 2010).

Predicción de sintéticos a partir de cruces simples

En base al trabajo de Kinman y Sprague (1945) se utilizó la fórmula de Wright (1922) con la finalidad de predecir el

rendimiento de grano de sintéticos F₂. La predicción se realizó a partir de los datos de rendimiento de las CS (F₁) reportados por Andrés-Meza *et al.* (2011). Los cálculos se basaron en el trabajo de Márquez (1979), considerando el mejor promedio de las CS involucradas; así el sintético de dos líneas contendrá las mejores dos líneas, el sintético tres las mejores tres líneas, y así hasta calcular sintéticos con 4, 5, 6, ..., n líneas. Se obtuvo el rendimiento calculado de los sintéticos F₂ usando los datos reales de las F₁ y \hat{P} (Figura 3).

Con este procedimiento y considerando acción génica aditiva, la predicción de rendimiento de grano de las F₁ fue una función descendente con un mínimo de n=13 líneas y un rendimiento de 5,08t·ha⁻¹, en tanto que, el rendimiento de los sintéticos F₂ se incrementa conforme aumenta el número de líneas hasta alcanzar su valor máximo de n=9 y un rendimiento aproximado de 5,11t·ha⁻¹.

Se observa una tendencia asintótica de F₁ y F₂ hacia la variedad VS-536, usada como punto de comparación por ser el mejor testigo, mientras que el promedio de las líneas involucradas en cada uno de los sintéticos predichos \hat{P} se aproxima al promedio de todos los progenitores P usados en el diseño dialélico. El compor-

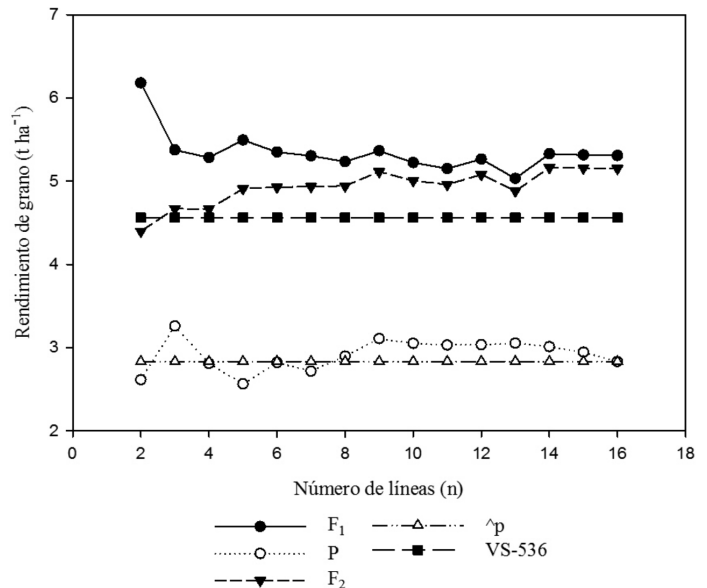


Figura 3. Rendimiento de grano (t ha⁻¹) de la F₁, \hat{P} y F₂, de acuerdo con la fórmula de Wright (1922).

tamiento de los sintéticos predichos en el presente trabajo se ajusta a los resultados obtenidos por Sahagún *et al.* (2013). Sin embargo, Márquez (2014a) menciona que al momento de realizar la predicción de sintéticos F₂ será necesario tener en cuenta la ACG y el nivel de endogamia de las líneas involucradas, sugerencia que es soportada por Kutka y Smith (2007) y Sahagún *et al.* (2013).

Conclusiones

Deberá prestarse atención a las líneas desde el punto de vista de su aptitud combinatoria general y al grado de avance endogámico que presentan, puesto que a mayor homocigosis mayor será el efecto heterótico en las cruces de las líneas componentes. Los resultados no fueron consistentes en los dos grupos de sintéticos evaluados a través de diferentes ambientes, debido a la fuerte interacción de las líneas (expresadas por los sintéticos que se integraron). Dentro del Grupo 1, el sintético 4C, de 12 líneas, superó en 9 y 25% a la variedad testigo VS-536 y V-537C de endospermo normal y ACP, respectivamente. En el Grupo 2, los sintéticos 9C y 10C, de seis y ocho líneas, lograron igualar estadísticamente

al mejor testigo VS-536; así mismo, lograron superar en 27% a la variedad V-537C de ACP. Por otra parte, la ecuación empírica de Wright, predijo una curva asintótica para F₁ y F₂ hacia VS-536, usada como variedad testigo. El rendimiento de los sintéticos F₂ se incrementa conforme aumenta el número de líneas hasta alcanzar su valor máximo de n=9. Por ello, un número de 9 a 12 líneas será adecuado para obtener sintéticos de alto rendimiento.

REFERENCIAS

- Andrés-Meza P (2010) *Análisis Dialélico para Rendimiento en Líneas de Maíz con Alta Calidad de Proteína*. Tesis. Colegio de Postgraduados. México. 45 pp.
- Andrés-Meza P, López-Collado CJ, Sierra-Macias M, López-Romero G, Leyva-Ovalle OR, Palafox-Caballero A, Rodríguez-Montalvo FA (2011) Combining ability in maize lines using a diallel cross. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 13: 525-532.
- Aung N, Khaing TT, Than H, Zar MT (2016) Evaluation of hybrid maize (*Zea mays* L.) performance crossing within inbreds developed by composite line selection method. *J. Agric. Res.* 3: 47-54.
- Bernardo R, Romero-Severson J, Ziegler J, Hauser J, Joe L,

- Hookstra G, Doerge RW (2000) Parental contribution and coefficient of coancestry among maize inbreds: Pedigree, RFLP, and SSR data. *Theor. Appl. Genet.* 100: 552-556.
- Dhilwayo T, Pixley K, Menkir A, Warburton M (2009) Combining ability, genetic distances, and heterosis among elite CIMMYT and IITA tropical maize inbred lines. *Crop Sci.* 49: 1201-1210.
- Donnet D, López L, Arista J, Carrión F, Hernández V, González A (2012) *El Potencial de Semillas Mejoradas de Maíz en México*. CIMMYT. Mexico. 21 pp.
- Escalante GJL, Sahagún-Castellanos J, Rodríguez-Pérez JE, Peña-Lomelí A (2013) Erosión genética en las cruces simples progenitoras de una variedad sintética. *Rev. Chapingo Ser. Hortíc.* 19: 151-161.
- FAO (2016) *Statistics*. Food Agriculture Organization. Roma, Italia. <http://apps.fao.org/>
- Hallauer AR, Miranda FJB (1988) *Quantitative Genetics in Maize Breeding*. 2ª ed. Iowa State University Press. Ames, IO, EEUU. 468 pp.
- Holland J.B. (2001) *Epistasis and Plant Breeding*. *Plant Breed. Rev.* 21: 27-92.
- CIMMYT (1999) *Development, Maintenance, and Seed Multiplication of Open-Pollinated Maize Varieties*. 2ª ed. International Maize and Wheat Improvement Center. Mexico. 11 pp.
- Kinman ML, Sprague GF (1945) Relation between number of parental lines and theoretical performance of synthetic varieties of corn. *J. Am. Soc. Agron.* 37: 341-351.
- Kutka FJ (2005) *New and Historical Issues Concerning Open-Pollinated Maize Cultivars in the United States*. Tesis. Cornell University. Ithaca, NY, EEUU. pp. 21-29.
- Kutka FJ, Smith ME (2007) How many parents give the highest yield in predicted synthetic and composite populations of maize? *Crop Sci.* 47: 1905-1913.
- Lonnquist JH (1951) Recurrent selection as a means of modifying combining ability in corn. *Agron. J.* 43: 311-315.
- Márquez SF (1979) An empirical approach for the prediction of maize F2 synthetics with varying numbers of lines. *Crop Sci.* 19: 439-444.
- Márquez SF (2007) Predicción de sintéticos de maíz hechos con cruces simples. *Agrociencia* 41: 647-651.
- Márquez SF (2008) De las variedades criollas de maíz (*Zea mays* L.) a los híbridos transgénicos. I: recolección de germoplasma y variedades mejoradas. *Agríc. Soc. Des.* 5: 151-166.
- Márquez SF (2014a) Comparación entre la predicción clásica del rendimiento en un sintético de maíz y la predicción general. *Rev. Fitotec. Mex.* 37: 313-314.
- Márquez SF (2014b) Epistasis en la variedad, la cruz varietal, el compuesto varietal y el sintético del maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 37: 319-324.
- Márquez-Sánchez F (2010) Epistasis en variedades sintéticas de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 33: 101-105.
- Melesio CJL, Preciado ORE, Terrón IAD, Vázquez CMG, Herrera MP, Amaya GCA, Serna SOS (2008) Potencial productivo, propiedades físicas y valor nutricional de híbridos de maíz de alta calidad proteínica. *Agríc. Téc. Méx.* 34: 225-233.
- Narro LA, Franco DJ, George MLC, Arcos AL, Osorio KV, Warburton ML (2012) Comparison of the performance of synthetic maize varieties created based on either genetic distance or general combining ability of the parents. *Maydica* 57: 83-91.
- Ortiz J (1961) Determinación del número óptimo de líneas seleccionadas en la formación de variedades sintéticas. Tesis. Escuela Nacional de Agricultura. México. pp. 23-37.
- Sahagún CJ, Rodríguez JEP, Escalante JLG (2013) Yield prediction and inbreeding of maize synthetics generated with lines and single crosses. *Classic probability. Rev. FCA Uncuyo* 45: 75-84.
- Sahagún CJ, Rodríguez JE, Peña AA (2005) Predicting yield of synthetic varieties derived from double crosses. *Maydica* 50: 129-136.
- SAS (1990) *SAS/STAT® vers. 9.0*. SAS Institute, Inc. Cary, NC, EEUU.
- Sierra M, Rodríguez FA, Castillo RA, Preciado RE, Márquez F (1992) *VS-536 Variedad Sintética de Maíz para el Trópico de Veracruz y Regiones Similares*. Folleto Técnico N° 2. Campo Experimental Cotaxtla. INIFAP. CIRGOC. Veracruz, México. 11 pp.
- Sierra MM, Palafox AC, Cano OR, Rodríguez FAM, Espinosa AC, Turrent AF, Gómez NM, Córdoba HO, Vergara NA, Avendaño RS, Sandoval JAR, Barrón SF, Romero JM, Caballero FH, González MC, Betanzos EM (2001) *Descripción varietal de H-519C, H-553C y V-537C, Maíces con Alta Calidad Proteica para el Trópico Húmedo de México*. Folleto Técnico N° 30. Campo Experimental Cotaxtla. INIFAP. CIRGOC. Veracruz, México. 21 p.
- Sierra M, Palafox A, Cano O, Rodríguez FA, Espinosa A, Turrent A, Gómez NO, Córdoba H, Vergara N, Aveldaño R (2004) H-553C, híbrido de maíz de calidad proteínica para el trópico húmedo de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 27: 117-119.
- Smith M, Seiter S, Mt. Pleasan J, Kutka F (2003) Performance of open-pollinated corn varieties for grain and silage production. En Reid L (Ed.) *Proc. 58th Northeast Corn Improvement Conf.* (13-14/02/2003). Ottawa, Canadá.
- Turrent FA (2012) Estrategias científicas y tecnológicas para reforzar la productividad agrícola de México ante el cambio climático. *Mem. Cienc. Human. Acad. Mex. Cs.* pp. 427-437.
- Vergara N, Rodríguez S, de León H, McLean S, Kumar S (2001) Aptitud combinatoria de líneas de maíz tropical con diferente tipo de mazorca. *Rev. Fitotec. Mex.* 24: 203-212.
- Wright S (1922) *The Effects of Inbreeding and Crossbreeding in Guinea Pigs*. USDA Bull. 1121. U.S. Gov. Print. Office. Washington, DC, EEUU. 91 p.