

Efecto de Xenia sobre las características de reventado en maíz palomero

Amalio Santacruz-Varela¹

Micaela de la O Olán^{2§}

Faustino Hugo Alegría-Hernández³

Rafael Ortega-Paczka³

Higinio López-Sánchez¹

Dora Ma. Sangerman-Jarquín²

¹Campus Montecillo-Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56230. Tel. 595 9520200, ext. 1570. (asvarela@colpos.mx; higinio@colpos.mx). ²Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México. CP. 56250. Tel. 800 0882222, ext. 85307. (sangerman.dora@inifap.gob.mx). ³Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. (faustino.alhe@gmail.com; ropaczka@gmail.com).

§Autora para correspondencia: olan.micaela@inifap.gob.mx.

Resumen

En el proceso de fertilización genética del maíz (*Zea mays* L.), el polen ejerce un efecto directo e inmediato sobre las propiedades de la cariósida conocido como Xenia. Esta situación reviste gran importancia en maíz palomero, pues la capacidad de reventado depende de las características del endospermo, por lo que es necesario estudiar la magnitud de la Xenia en maíces palomeros, para emitir recomendaciones para la producción y la conservación. En el presente estudio se llevó a cabo en 2018, se evaluó el efecto de Xenia de variedades de maíz de diferente constitución de endospermo, sobre características físicas y de reventado del cariósida. El experimento se realizó en dos localidades, Montecillo, Estado de México y Santa María Zacatepec, municipio de Juan C. Bonilla, Puebla, utilizando un diseño experimental de bloques completos al azar. Como progenitores hembra se utilizaron las variedades de maíz palomero Compuesto Amarillo y North American Yellow Pearl Popcorn, mientras que como progenitores macho se emplearon los mismos materiales, CML-349 de endospermo semi-cristalino y una población de la raza Cacahuacintle de endospermo harinoso. Los resultados mostraron que el Compuesto Amarillo presentó una disminución de las dimensiones de la cariósida de 0.17 a 13%, mientras que en NAYPP el efecto resultó en incremento de 2.27 a 18%. El volumen de reventado presentó el mayor efecto de Xenia, ya que en el Compuesto Amarillo éste disminuyó de 25 a 49% cuando se polinizó con los maíces no palomeros, mientras que en NAYPP la disminución fue de 59%. Con los resultados, existió efecto de Xenia en el maíz palomero evaluado, el cual fue mayor sobre el volumen de expansión, mientras que en las características físicas del cariósida este efecto fue menos acentuado.

Palabras clave: *Zea mays*, endospermo, maíz palomero, polinización, variedades, Xenia.

Recibido: junio de 2022

Aceptado: noviembre de 2022

Introducción

El flujo de genes es el movimiento natural de estos entre organismos, a través de un proceso de migración y posterior recombinación sexual o hibridación entre la población migrante y la receptora. En las plantas, este proceso ocurre cuando el polen poliniza y fertiliza exitosamente otra planta (Guzmán *et al.*, 2008). En el proceso de fertilización genética del maíz (*Zea mays* L.), el polen ejerce un efecto directo e inmediato sobre las propiedades del cariósido resultante conocido como Xenia, este efecto puede ser definido como la acción de los genes del polen sobre el desarrollo del fruto o las semillas (Bulant *et al.*, 2000).

En maíz, se ha reportado un incremento de 10.1% en el peso del cariósido cuando la fertilización es cruzada en comparación a la auto fertilización (Villarreal *et al.*, 2010), ya que desde el punto de vista genético, la ventaja de la fertilización cruzada o efecto Xenia puede ser interpretada en términos de la complementación entre los genes del macho y la hembra, lo que modifica algunos sistemas enzimáticos y propiciando con ello la heterosis, lo que se puede notar principalmente al final de la ruta metabólica, como en el caso de la del almidón (Bulant *et al.*, 2000).

La fracción del maíz que más se relaciona con sus usos como alimento es el endospermo (González *et al.*, 2005), cuya composición ocupa cerca de dos terceras partes del volumen del fruto y constituye aproximadamente 86% de su peso seco, carácter al que usualmente controlan uno o unos pocos genes de herencia simple. Con base en su tipo de endospermo, el maíz se clasifica en dulce, dentado, harinoso, cristalino y palomero (Figuroa *et al.*, 2013). De acuerdo con esta clasificación, se tienen cariósidos con diferente constitución de endospermo, como es el caso del maíz harinoso que, como su nombre lo indica, está constituido por un endospermo de estructura desagregada (harina) y carece de endospermo cristalino, a diferencia del maíz palomero que está constituido de manera muy predominante por un endospermo cristalino muy duro y que solo cuenta con una pequeña porción de endospermo harinoso (Estrada *et al.*, 1999).

El maíz palomero de México está representado por varias razas, y la mayoría de ellas se encuentra en peligro de extinción debido a su baja productividad y a caracteres indeseables relacionados con la nixtamalización e incluso con su uso en la elaboración de palomitas (De la O *et al.*, 2015). El maíz generalmente no manifiesta inconveniente de incompatibilidad entre las diferentes razas y se poliniza fácilmente a través de la acción del viento, además de que los agricultores mexicanos a menudo intercambian semillas y su siembra genera mezclas de distintas fuentes, lo que deriva en recombinación y pérdida de características específicas de la raza original (SCCA, 2004).

En maíz palomero, la porción aprovechable y característica deseable es el endospermo del cariósido, porción que en presencia de calor y humedad se expande para producir rosetas (palomitas) y el tejido del endospermo es triploide, con dos porciones de información genética aportadas por la planta madre y una porción aportada por el progenitor masculino a través del polen.

El maíz palomero posee un balance preciso en la expresión de características anatómicas del cariósido en términos de grosor de pericarpio, proporción y patrón de distribución de endospermo cristalino y harinoso, y tamaño de germen (Bautista *et al.*, 2019), todas ellas con un amplio control genético, además de genes intrínsecos para capacidad y características de reventado, los cuales es necesario conservar a fin de que el cariósido no pierda sus cualidades. Por lo tanto, con base en el

tipo de fertilización que el maíz posee y la facilidad que tienen de cruzarse entre sí las diferentes poblaciones que existen, resulta importante conocer los efectos inmediatos que tendrá el polen de maíces de diferente constitución de endospermo sobre las características del cariósido del maíz palomero y por consiguiente, el efecto sobre el reventado, lo cual tiene implicaciones sobre el manejo de las parcelas de producción y sobre la conservación de los recursos genéticos del maíz palomero.

Por lo anterior, los objetivos planteados para la presente investigación fueron: 1) evaluar el efecto directo e inmediato del polen de variedades de maíz de diferente constitución de endospermo sobre las características físicas de la cariósida de maíz palomero; y 2) evaluar el efecto de Xenia del polen de variedades de maíz de diferente constitución de endospermo sobre el volumen de reventado de maíz palomero y sobre las características de la palomita obtenida.

Materiales y métodos

Material genético

En este trabajo se utilizaron como hembras dos poblaciones de maíz palomero, una fue el Compuesto Amarillo (CA), que proviene de una población estabilizada formada a partir de un híbrido de la raza Palomero Toluqueño (Mex-5) × Perla Amarillo de los Estados Unidos de Norteamérica, del que se seleccionaron cariósidos de color amarillo y después de una recombinación genética entre ellos se originó la población CA.

La otra población fue de la raza de maíz palomero North American Yellow Pearl Popcorn (NAYPP), que corresponde al tipo de maíz más comúnmente cultivado de manera comercial en la franja maicera de los Estados Unidos de América. Como machos se utilizaron los dos materiales anteriores, la línea endogámica CML-349, de endospermo semi-cristalino, cariósida blanca y de madurez temprana adaptada a tierras altas y una población de maíz criollo de la raza Cacahuacintle (CAC) de endospermo harinoso, nativo del Valle de Texcoco y característico de los Valles Altos del centro de México.

Sitios experimentales

Los experimentos de polinización se establecieron durante el ciclo primavera-verano de 2018 en dos ambientes de Valles Altos Centrales, uno fue la localidad de Montecillo, municipio de Texcoco, Estado de México (19° 27' 18" latitud norte y 98° 54' 26" longitud oeste, a una altitud de 2 240 m, con temperatura media anual de 12-18 °C y precipitación media anual de 637 mm) (García, 1988). El otro ambiente fue Santa María Zacatepec, municipio de Juan C. Bonilla, Puebla (19° 06' 00" latitud norte y 98° 20' 00" longitud oeste, a una altitud de 2 206 m) (INEGI, 2009).

Diseño experimental, unidad experimental y tratamientos

La combinación de genotipos (dos hembras x cuatro machos) dio un total de ocho tratamientos, los cuales se establecieron en ambas localidades bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental de las plantas hembra consistió en parcelas de dos surcos de 5 m de longitud y 0.8 m de ancho, donde se sembró a razón de tres semillas cada 50

cm y posterior a la segunda labor se aclaró a dos plantas, teniendo una densidad final de 55 000 plantas ha⁻¹. Adicionalmente, se establecieron las parcelas de plantas macho, las cuales consistieron de seis surcos con las mismas especificaciones de siembra descritas; de estas parcelas se tomó polen para formar los diferentes tratamientos.

Para evitar presencia de polen de otras fuentes sobre las plantas hembra, los jilotes de estas se cubrieron con bolsas de papel glassine número 8 antes de la exposición de estigmas; también previo a la anthesis se cubrieron las espigas de las plantas macho con bolsas de espiga, de papel de estraza calibre 12, de 30 cm de largo y 17.5 cm de ancho, durante las primeras horas de la mañana. La colecta del polen de las espigas cubiertas se realizó después de las 10 de la mañana y se depositó sobre los jilotes con estigmas desarrollados de los receptores hembra correspondientes.

Variables evaluadas

De una muestra compuesta formada por la mezcla física del grano proveniente de cinco mazorcas representativas por unidad experimental, se tomó el promedio del largo (LG), ancho (AG) y espesor (EG) de 10 cariósides al azar, medidos con un vernier digital. De igual manera, se contaron 100 cariósides por unidad experimental, a los cuales se les determinó su peso (P100G) en g en una balanza analítica y su volumen (V100G) en cm³ por desplazamiento de agua en una probeta.

Para evaluar las características de reventado, el grano cosechado se llevó a una humedad de equilibrio de entre 13.5 y 14% a fin de maximizar el volumen de expansión que, de acuerdo con Gökmen (2004), en maíz palomero se logra a esos niveles de humedad; para ello, se acondicionaron 40 gramos de cariósides por unidad experimental en una cámara de ambiente controlado a 21 °C, con una humedad relativa de 70% por ocho días (Ziegler, 2001).

Para el reventado se empleó el método estandarizado por De la O *et al.* (2015), el cual consistió en determinar el volumen de palomitas producido por una muestra de 30 g de cariósides acondicionado. La muestra se colocó en un recipiente de polipropileno resistente al calor y se procesó en un horno de microondas (Daewoo® Kor-164H), ajustado a 70% de su potencia durante 2:45 min, las palomitas que se obtuvieron se colocaron en una probeta de 2 L para determinar el volumen de reventado en cm³.

El porcentaje de cariósides no reventados se calculó con el peso de los cariósides no reventados después del tratamiento de calor en el horno de microondas sobre el peso total de la muestra de cariósides acondicionado (30 g). El tipo de palomita se evaluó mediante una escala visual de 1 a 5 de acuerdo con la forma en que reventaron, un valor de 1 se utilizó para identificar una roseta en forma esférica (tipo hongo) y 5 para una roseta alargada con protuberancias (tipo mariposa). La pulverización del pericarpio, como desintegración de este tras el proceso de elaboración de palomitas, se midió con una escala visual del 1 al 5, donde 1 correspondió a un pericarpio totalmente pulverizado y 5 a uno con escasa desintegración.

El efecto de Xenia provocado por el polen de cada uno de los machos sobre el cariósides de cada una de las hembras para las variables evaluadas se estimó mediante la fórmula, propuesta por los autores: $EX = \left(\frac{HM}{HF} - 1 \right) \times 100$. Donde: EX= efecto de Xenia en porcentaje sobre una característica del cariósides; HM= expresión fenotípica de características del cariósides de maíz palomero

polinizado con polen de un macho de diferente tipo de endospermo; y HF= expresión fenotípica de características del cariósido de maíz palomero polinizado con polen de la misma población, equivalente a la hembra con cruza fraternal de plantas macho de su mismo tipo.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza mediante el modelo lineal correspondiente al diseño de bloques completos al azar. Los datos en porcentaje de cariósido no reventado y de las escalas visuales 1-5 se transformaron con la fórmula: arcoseno en el análisis de varianza. También se aplicó una prueba de comparación de medias de Tukey al 5% mediante el paquete estadístico Sas® (SAS Institute, 2002).

Resultados y discusión

Variación de características físicas y de reventado de cariósido

El análisis de varianza detectó alta significancia ($p \leq 0.01$) entre localidades (Loc) para tres (LG, AG y pulverización del pericarpio) de las nueve variables (Cuadro 1). Este resultado indica que el ambiente tiene un efecto importante sobre la expresión de estas tres características de la cariósido de maíz palomero, debido a los efectos climáticos y edáficos propios de las localidades de estudio, lo que incluye las fechas de siembra, manejo agronómico, el tipo de suelos y los elementos del clima de cada localidad. Estos resultados están en concordancia con los reportados por Daros *et al.* (2002) en un trabajo similar, quienes observaron diferencias entre ambientes y además detectaron efectos significativos de la interacción genotipo-ambiente para rendimiento de cariósido, días a floración, altura de planta y capacidad de reventado.

Entre las hembras (CA y NAYPP) (Cuadro 1) hubo diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) para longitud de cariósido, espesor de cariósido, peso de 100 cariósidos, porcentaje de cariósido no reventado y tipo de palomita, lo que indica que entre los materiales hembra existe alta variación para estas características. Entre los machos (M), el efecto en las cariósidos de las hembras por su aporte de polen fue altamente significativo ($p \leq 0.01$) para LG y volumen de reventado, lo que sugiere que hay diferencias entre machos para estas dos características, por lo que su polen tuvo un efecto notorio sobre el maíz palomero (Cuadro 1).

La interacción hembras \times machos (H \times M), que puede interpretarse como una representación directa de los efectos de Xenia, resultó altamente significativa ($p \leq 0.01$) para volumen de reventado, porcentaje de cariósido no reventado y pulverización del pericarpio, por lo que es evidente que el tipo de polen del donador y su efecto en la cariósido del recepto es importante en el efecto de Xenia, pero con efecto marcadamente diferencial de acuerdo con la hembra de que se trate (Cuadro 1). La interacción localidades \times hembras, (Loc \times H), (Cuadro 1) tuvo alta significancia ($p \leq 0.01$) para P100G, V100G, volumen de reventado, tipo de pericarpio y pulverización del pericarpio, mientras que para LG y cariósido no reventado resultó significativa ($p \leq 0.05$), esto hace evidente que las hembras se comportaron de manera diferencial para estas características a través de las localidades, y esto pudo ser debido a la diferente respuesta genética de los materiales a la influencia de los factores climáticos y edáficos de las localidades, así como al manejo agronómico proporcionado en cada una de ellas, como fecha de siembra, riego, fertilización, etc.

Cuadro 1. Cuadrados medios de nueve características de dos variedades de maíz palomero polinizadas con cuatro machos contrastantes en endospermo. Primavera-verano de 2018.

	FV	GL	LG	AG	EG	P100G	V100G	Volumen de reventado	Cariópside no reventada (%)	Tipo de palomita (1-5)	Pericarpio pulverizado (1-5)
Loc	1	516.07**	271.51**	17.93ns	39.18*	13.02ns	6302.08ns	0.47ns	3*	13.54**	
Rep/Loc	4	28.45ns	49.81ns	37.06ns	8.82ns	21.04ns	3116.66ns	119.7ns	1.35*	0.36ns	
H	1	8030.82**	138.17*	217.26**	116.59**	42.18*	7252.08ns	1228.77**	6.75**	0.88ns	
M	3	248.98**	13.68ns	28.23ns	5.12ns	8.68ns	20974.3**	73.98ns	1.09ns	0.1ns	
H × M	3	92.42ns	45.31ns	11.31ns	1.72ns	11.68ns	31035.41**	450.51**	0.56ns	2.43**	
Loc × H	1	227.54*	37.24ns	2.71ns	129.92**	136.68**	15768.75**	619.49*	5.33**	9.63**	
Loc × M	3	20.97ns	74.95*	38.7ns	15.16ns	14.18ns	6540.97*	40.31ns	0.62ns	0.35ns	
Loc × H × M	3	97.8ns	96.21*	37.84ns	16.36ns	36.96*	24796.52**	372.91*	1.04ns	0.32ns	
Error	28	50.04	23.56	17.91	8.52	10.04	1778.57	85.97	0.49	0.23	

*= significancia a 5%; **= significancia a 1%; ns= no significativo; LG= longitud de cariópside; AG= ancho de cariópside; EG= espesor de cariópside; P100G= peso de 100 cariósides; V100G= volumen de 100 cariósides.

Por otro lado, solo se observó diferencia significativa ($p \leq 0.05$) para AG y volumen de reventado en la interacción localidades × machos (Loc × M) (Cuadro 1), lo que indica que el efecto del polen de cada macho sobre AG y el volumen de reventado de las cariósides de las hembras fue diferente a través de las localidades, esto como una respuesta diferencial del genotipo a los efectos ambientales contrastantes de cada localidad.

H= hembras; M= machos; Loc= localidades; Rep= repeticiones. La interacción localidades × hembras × machos, (Loc × H × M) (Cuadro 1) resultó significativa ($p \leq 0.05$) para AG y V100G y altamente significativa ($p \leq 0.01$) para el volumen de reventado, lo que es importante resaltar, ya que esta variable, además de que muestra su alta complejidad genética y de respuesta al ambiente, representa a la vez la característica de mayor valor y la más deseable para la producción de maíces palomeros.

En el Cuadro 2 se muestran los resultados de las características físicas de la cariópside en promedio de localidades. Se observó que en Montecillo los materiales genéticos presentaron superioridad estadística en tres (LG, AG y P100G) de las cinco variables evaluadas, lo que resalta nuevamente la importancia de los efectos del ambiente sobre la respuesta de los genotipos, tales como factores climáticos y edáficos de las localidades, así como los del manejo agronómico (fecha de siembra, riego, fertilización, etc.). En la comparación de medias entre localidades para las características de reventado (Cuadro 3), se observaron diferencias estadísticas significativas para tipo de palomita y pulverización del pericarpio, resultado que concuerda con lo reportado por Alexander y Creech (1977) en el sentido de que el fenómeno de expansión es un rasgo poligenético, sujeto a cierta influencia del medio ambiente.

Cuadro 2. Comparación de medias de localidades para cinco características físicas de la cariósida de dos variedades de maíz palomero polinizadas con cuatro machos contrastantes en endospermo. Primavera-verano de 2018.

Localidad	LG (mm)	AG (mm)	EG (mm)	P100G (g)	V100G (cm ³)
Montecillo	93.93 a	62.9 a	43.64 a	14.4 a	17.95 a
Zacatepec	87.37 b	58.14 b	42.41 a	12.59 b	16.91 a
DHS 5%	4.18	2.87	2.5	1.72	1.87

Medias con la misma letra dentro de columna no son significativamente diferentes (Tukey 0.05). LG= longitud de cariósida; AG= ancho de cariósida; EG= espesor de cariósida; P100G= peso de 100 cariósidas; V100G= volumen de 100 cariósidas; DHS= diferencia honesta significativa.

Cuadro 3. Comparación de medias de localidades para cuatro características de reventado de la cariósida de dos variedades de maíz palomero polinizadas con cuatro machos contrastantes en endospermo. Primavera-verano de 2018.

Localidad	Volumen de reventado (cm ³ 30 g ⁻¹)	Cariósida no reventada (%)	Tipo de palomita (1-5)	Pulverización del pericarpio (1-5)
Montecillo	184.58 a	36.59 a	1.95 b	2.1 b
Zacatepec	161.67 a	36.79 a	2.45 a	3.16 a
DHS 5%	24.93	5.48	0.41	0.28

Medias con la misma letra dentro de columna no son significativamente diferentes (Tukey 0.05). LG= longitud de cariósida; AG= ancho de cariósida; EG= espesor de cariósida; P100G= peso de 100 cariósidas; V100G= volumen de 100 cariósidas; DHS= diferencia honesta significativa.

Por otro lado, la comparación entre promedios de los materiales hembra (H) (Cuadro 4) indicó que el compuesto amarillo produjo cariósidas de mayor longitud, ancho, peso y volumen y que NAYPP presentó el mayor espesor de cariósida, esto debido a que el compuesto amarillo contiene información genética de maíces palomeros tipo arroz, y NAYPP es de tipo perla (granos más redondos).

Los resultados también muestran que el porcentaje de cariósida no reventada no fue diferente entre CA y NAYPP, pero sí lo fue el volumen de reventado. El tipo de palomita sí fue diferente entre las dos variedades, pues NAYPP produjo rosetas alargadas y un poco protuberantes, mientras que CA produjo rosetas más esféricas y de tamaño mediano.

En el Cuadro 4 se comparan las medias de cada macho apareado con las dos hembras, lo que en promedio mide la influencia de cada uno. Se puede observar que las características físicas de la cariósida no tuvieron diferencias significativas, con excepción de LG que se vio disminuida por la acción del macho CML-349. Por otro lado, sí se encontraron diferencias significativas en el volumen de reventado, formándose dos grupos diferentes: 1) el de volumen de reventado más alto, donde las cariósidas polinizadas con polen de Compuesto Amarillo y NAYPP, ambos palomeros, presentaron un incremento de 22.08 cm³ y 47.5 cm³, respectivamente; y 2) el que se obtuvo con los efectos de la polinización con Cacahuacintle y CML-349, maíces no palomeros de endospermo harinoso y semicristalino, respectivamente.

Cuadro 4. Comparación de medias entre dos hembras de maíz palomero y entre cuatro machos contrastantes en endospermo para características físicas y de reventado de cariósido. Primavera-verano de 2018.

Características	LG (mm)	AG (mm)	EG (mm)	P100G (g)	V100G (cm ³)	Volumen de reventado (cm ³)	Cariósido no reventada (%)	Tipo de palomita (1-5)	Pulverización del pericarpio (1-5)
Hembra									
Compuesto amarillo	103.59a	62.22a	40.9b	15.05a	18.37a	185.42a	41.75a	1.83b	2.77a
NAYPP	77.72b	58.83b	45.15a	11.94b	16.5b	160.83a	31.63b	2.58a	2.5a
DHS (%)	4.18	2.87	2.5	1.72	1.87	24.93	5.48	0.41	0.28
Macho									
Compuesto amarillo	93.16a	61.97a	41.92a	14.36a	18.5a	207.5a	39.52a	2.54a	2.66a
NAYPP	92.04a	59.8a	44.92a	12.83a	16.41a	208.33a	37.48a	2.33ab	2.54a
Cacahuacintle	93.52a	60.68a	41.64a	13.58a	17.41a	152.5b	36.15a	1.83b	2.75a
CML-349	83.88b	59.64a	43.62a	13.21a	17.41a	124.17b	33.6a	2.12ab	2.58a
DHS (%)	5.91	4.05	3.53	2.44	2.65	35.26	7.75	0.58	0.4

Medias con la misma letra en cada columna dentro de cada tipo de progenitores (hembras o machos) no son significativamente diferentes (Tukey 0.05). LG= longitud de cariósido; AG= ancho de cariósido; EG= espesor de cariósido; P100G= peso de 100 cariósidos; V100G= volumen de 100 cariósidos; DHS= diferencia honesta significativa.

Las cariósides polinizadas con estos materiales tuvieron volúmenes de expansión más bajos (55 cm³) que cuando fueron polinizadas con polen de CA y NAYPP (84 cm³). Estos resultados indican un claro efecto de Xenia, que aquí se caracterizó por la disminución en volumen de reventado y que se asemeja a los resultados obtenidos por Lyerly (1942), quien observó una reducción de 1.4 volúmenes en el reventado de maíz palomero Perla Amarillo polinizado con maíz harinoso, resultados similares obtuvieron Dofing *et al.* (1991) al observar una disminución en el volumen de reventado cuando cruzaron maíces palomeros con maíz dentado; por su parte, Robbins y Ashman (1984), al cruzar maíces palomeros de líneas endogámicas de la raza Perla Amarillo (HP-62-52 y 4722) con líneas endogámicas de maíz cristalino (CM80) y maíz dentado (B2), encontraron que tanto las generaciones F₂ y F₃, como las cruces de HP62-52 × CM80 (palomero × cristalino) mostraron mayor volumen de expansión que la cruce HP-62-52 × B2 (palomero × dentado), mientras que las generaciones F₂ y F₃ de las cruces 4722 × CM80 (palomero × cristalino) y la cruce 4722 × B2 (palomero × dentado) no mostraron diferencias significativas en los volúmenes de expansión, mostrando así que los efectos de Xenia tienen una magnitud variable y específica, dependiendo de los genotipos y los ambientes involucrados.

Los resultados indican que los materiales genéticos cuando actuaron como machos propiciaron una clara reducción en LG, AG, P100G y V100G en las cariósides del Compuesto Amarillo, como se comprueba al ser comparado con los resultados obtenidos cuando éste fungió como hembra. Este resultado es similar al obtenido por Dofing *et al.* (1991), donde en un trabajo parecido dos cruces de maíz palomero × maíz dentado tuvieron una disminución en el peso de las cariósides. Por su

parte, el material NAYPP se vio favorecido por un incremento en las características antes citadas, lo que concuerda con los resultados de Bozinovic *et al.* (2012), quienes observaron un aumento en el peso de las cariósides de un híbrido de maíz fértil en comparación con los de su versión estéril.

Efectos de Xenia para características físicas y de reventado de la cariósida

Al cuantificar los efectos de xenia (Cuadro 5), se observó que para el CA el polen de los maíces no palomeros (Cacahuacintle y CML-349), en general provocó una disminución en las características físicas de la cariósida del compuesto (LG, AG, EG, P100G y V100G), así como en el volumen de reventado. Esto indica que hubo una disminución en estas variables por el efecto de Xenia, lo cual no ocurrió cuando se polinizó a la hembra con polen de plantas de su mismo tipo (cruza fraternal). De manera similar, el volumen de reventado y el porcentaje de cariósides no reventados se vieron desfavorecidos cuando CA fue polinizado por los machos de maíz no palomero.

Cuadro 5. Cuantificación de los efectos de Xenia (%) para características físicas y de reventado de cuatro maíces contrastantes en endospermo sobre las cariósides dos maíces palomeros. Primavera-verano de 2018.

Hembra	Macho	LG	AG	EG	P100G	V100G	Volumen de reventado	Cariósida no reventada (%)	Tipo de palomita (1-5)	Pericarpio pulverizado (1-5)
CA	CA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CAC	-0.17	-2.32	-0.95	-7.11	-13.94	-25	0.24	-16.66	14.28
	NAYPP	-6.19	2.32	11.18	-10.83	-10.67	-42.94	23.69	-12.5	39.28
	CML-349	-12.51	-4.54	2.01	-12.51	-13.92	-46.79	24.06	-4.16	21.42
NAYPP	NAYPP	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CAC	-4.36	8.45	-3.78	393.93	18.17	-59	24.48	-31.42	54.54
	CML-349	-11.52	7.24	2.27	9.29	18.17	-59	12.49	-20	27.27
	CA	-5.49	10.5	-3.39	11.59	13.6	-42.23	13.42	5.71	63.63

En relación con el tipo de palomita, se puede observar que el efecto de Xenia fue más acentuado con el polen de Cacahuacintle (-16.66%), pues provocó un tipo de palomita más esférica en relación con la cruce fraternal de Compuesto Amarillo. El efecto que el polen de NAYPP originó para pulverización de pericarpio en CA fue el de mayor relevancia, debido a que aumentó esta característica en 39.28%.

Para el caso del maíz palomero NAYPP (Cuadro 5), los resultados indican que el efecto de Xenia provocó un aumento en las variables AG, P100G y V100G cuando esta variedad se polinizó con el polen de plantas de su mismo tipo (cruza fraternal) y cuando el polen provino del palomero compuesto amarillo hubo un aumento de 10.5% en la variable AG. En el caso de P100G, fue el macho Cacahuacintle quien causó un efecto más acentuado (393.33%) y para V100G tanto CML-349 y CAC fueron los que causaron un mayor aumento (18.7%).

El volumen de reventado, al igual que ocurrió en el CA, se vio disminuido en igual proporción tanto por el polen de Cacahuacintle como por el de CML-349 (-59%), resultados que cuando ocurren en el campo no son favorables para el productor ni para el consumidor. El porcentaje de

cariópside no reventado aumentó en 24.48% y 12.49% con polen de Cacahuacintle y de CML-349, respectivamente, resultado que no es favorable debido a que representa una mayor cantidad de cariósides desperdiciados. El tipo de palomita también fue modificado, pasando de una expansión unilateral (NAYPP × NAYPP) a semiesférica (NAYPP × Cacahuacintle). La pulverización del pericarpio pasó de ser casi intacto (NAYPP × NAYPP) a semipulverizado (NAYPP × CA y NAYPP × CAC).

Conclusiones

Se encontraron efectos de Xenia tanto para las características físicas del cariópside como para las características de reventado del mismo al ocurrir la polinización del maíz palomero con un tipo diferente de maíz; sin embargo, este efecto en general fue mayor para en el volumen de expansión y pulverización del pericarpio que para las características de cariópside. Los efectos de Xenia son específicos en magnitud de acuerdo con el carácter y el genotipo evaluado. En las características físicas de la cariópside, el Compuesto Amarillo tuvo efecto de Xenia, que se reflejó en la disminución del tamaño de la cariópside (LG, AG, EG y P100G), con excepción del volumen de 100 cariósides, donde aumentó apenas 0.13 cm³ en promedio.

El NAYPP también tuvo efecto de Xenia, reflejado en el aumento de tamaño de la cariópside (LG, AG, P100G y V100G), con excepción del espesor, que tuvo una disminución de 0.23 mm en promedio. Los machos provocaron efectos de Xenia diferentes y únicamente CML-349 produjo Xenia en la longitud de la cariópside, siendo negativa, ya que la longitud del cariópside disminuyó 12.51% en el compuesto amarillo y 11.52% en NAYPP. Asimismo, los maíces palomeros polinizados con materiales no palomeros produjeron un volumen y porcentaje de reventado menores.

Literatura citada

- Alexander, D. E. and Creech, R. G. 1977. Popcorn. *In*: Sprague, G. F. (Org). Corn and corn improvement. American Society of Agronomy, Madison, WI. 385-390 pp.
- Bautista, R. E.; Salinas, M. Y.; Santacruz, V. A.; Córdova, T. L. y López, S. H. 2019. Características físicas y químicas de la raza de maíz Palomero Toluqueño. *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 10(2):441-446.
- Bozinovic, S.; Vancetovic, J.; Prodanovic, S.; Camdzija, Z.; Stevanovic, M.; Grčić, N. and Crevar, M. 2012. Different xenia effect on sterile and fertile versions of hybrids in maize. *Proceedings of the Third International Scientific Symposium 'Agrosym Jahorina 2012'*. Lukavica, Bosnia-Herzegovina. 285-289 pp.
- Bulant, C.; Gallais, A.; Matthys, R. E. and Prioul, J. L. 2000. Xenia effects in maize with normal endosperm: II. Kernel growth and enzyme activities during grain filling. *Crop Sci.* 40(1):182-189.
- Daros, M.; Texeira, A. A. J. and Gonzaga, P. P. M. 2002. Genetic gain for grain yield and popping expansion in full-sib recurrent selection in popcorn. *Crop Breed, Appl. Biotechnol.* 2(3):339-344.
- De la O, O. M.; Santacruz, V. A.; Sangerman, J. D. M.; Gámez, V. A. J.; Arellano, V. J. L., Valadez B. M. G. y Ávila, P. M. A. 2018. Estandarización del método de reventado para la evaluación experimental del maíz palomero. *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 9(7):1471-1483.

- Dofing, S. M.; D’Croz, M. N. and Thomas, C. M. A. 1991. Inheritance of expansion volume and yield in two popcorn \times dent corn crosses. *Crop Sci.* 31(3):715-718.
- Estrada, G. J. A.; Hernández, L. A.; Hernández, O. F.; Carballo, C. A. y González, C. F. V. 1999. Tipos de endospermo en maíz y su relación con la calidad de semilla. *Rev. Fitotec. Mex.* 22(1):99-109.
- Figueroa, C. J. D.; Narváez, G. D.E.; Mauricio S. A.; Taba, S.; Gaytán, M. M.; Véles, M. J. J.; Rincón, S. F. y Aragón, C. F. 2013. Propiedades físicas del grano y calidad de los grupos raciales de maíces nativos criollos de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 36(3-A):305-314.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México, DF. 246 pp.
- Gökmen, S. 2004. Effects of moisture content and popping method on popping characteristics of popcorn. *J. Food Eng.* 65(3):357-362.
- González, R. J.; Torres, R.; De Greef, D.; Bonaldo, A.; Robutti, J. y Borrás, F. 2005. Efecto de la dureza del endospermo del maíz sobre las propiedades de hidratación y cocción. *Arch. Lat. Nutr.* 55(4):354-360.
- Guzmán, H. M.; San Vicente, G. F. y Díaz, M. D. 2008. Flujo de polen entre híbridos tropicales de maíz de diferente color de endospermo. *Bioagro.* 20(3):159-166.
- INEGI. 2009. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Huejotzingo, Puebla. Clave geoestadística 21074. Aguascalientes.
- Lyerly, P. J. 1942. Some genetic and morphologic characters affecting the popping expansion of popcorn. *J. Am. Soc. Agron.* 34(11):986-999.
- Robbins, W. A. and Ashman, R. B. 1984. Parent-offspring popping expansion correlations in progeny of dent corn popcorn and flint corn popcorn crosses. *Crop Sci.* 24(1):119-121.
- SAS, Institute. 2002. SAS/STAT User’s Guide, Software Release 9.0. Statistical Analysis System Institute Inc. Cary, NC, USA. 4424 pp.
- SCCA. 2004. Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental. Maíz y biodiversidad efectos del maíz transgénico en México. Conclusiones y recomendaciones. Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. Quebec, Canadá. 38 p.
- Villarreal, A.; Rodríguez, H. R.; Reyes, V. M. H.; Espinosa, V. J. y Castillo, R. F. 2010. Xenia y su relación con la poliembriónía en maíz. *Acta Química Mexicana.* 2(3):1-7.
- Ziegler, K. E. 2001. Popcorn. *In: speciality corns.* A. R. Hallauer. 2nd (Ed.). CRC Press. Boca Raton, FL. 199-234 pp.