

Volumen de expansión de grano de amaranto en poblaciones locales y variedades mejoradas

Ana Rosa Ramírez-Pérez¹

Enrique Ortiz-Torres^{1§}

Adrián Argumedo-Macías¹

Micaela De la O-Olán²

Carmen Jacinto-Hernández²

Ignacio Ocampo-Fletes¹

¹Colegio de Postgraduados-Campus Puebla. Boulevard Forjadores de Puebla núm. 205. Santiago Momoxpan, San Pedro Cholula, Puebla, México. CP. 72760. (anarosa-rmz@yahoo.com.mx; aadrian@colpos.mx; agroecologia-iof@yahoo.com). ²Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. AP. 10. CP. 56230. (micaelaolan@yahoo.com.mx).

§Autor para correspondencia: enriqueortiz@colpos.mx.

Resumen

En México la forma común de comercialización y de consumo de amaranto es como grano reventado. Sin embargo, son pocos los estudios sobre la diversidad en el volumen de expansión de grano en las especies y poblaciones de amaranto. El objetivo fue evaluar la diversidad en volumen de expansión de grano en 36 poblaciones locales y variedades mejoradas de amaranto. Se utilizaron granos provenientes de una evaluación en campo en cuatro localidades realizadas en 2015 y 2016. Se usó un diseño experimental de látice 6 x 6 con dos repeticiones. En 2018 se evaluó el volumen de expansión de grano reventado. Se usaron 36 variedades de amaranto, de las cuales 30 fueron poblaciones del municipio de Tochimilco, Cohuecan y Huaquechula, Puebla, México y las variedades Amaranteca, Benito, Nutrisol, Revancha, Laura y Gabriela. Las muestras se acondicionaron a 12% de humedad y reventaron en una máquina de lecho fluidizado por aire caliente a una temperatura de 230-235 °C. Después del reventado se registró el peso y volumen del grano reventado y no reventado. Se realizó un análisis de varianza y prueba de medias. Los resultados muestran que existieron diferencias estadísticas ($p \leq 0.01$) entre variedades y localidades para todos los caracteres evaluados. En volumen de expansión el rango de variación fue de 6.2 a 10.6 ml g⁻¹. En la calidad por tamaño de grano reventado 24 colectas fueron sobresalientes en tamaño reventado grande y mediano.

Palabras clave: *Amaranthus cruentus*, *Amaranthus hypochondriacus*, peso hectolítrico, peso de grano.

Recibido: mayo de 2022

Aceptado: julio de 2022

Introducción

México tiene amplia diversidad en amaranto. Para grano se tienen las especies *A. hypochondriacus* y *A. cruentus* (Espitia *et al.*, 2010). En las cuales se ha reportado amplia diversidad morfológica entre y dentro de especies (Espitia *et al.*, 2012; de la O *et al.*, 2012; Mapes *et al.*, 2012; Ruíz *et al.* 2013). Sin embargo, existen sólo 10 variedades mejoradas de amaranto en México (Córdova *et al.*, 2019).

El grano de amaranto se consume principalmente como grano reventado (Escobedo-López *et al.*, 2012). Este proceso confiere al grano mejor sabor, color, aroma, digestibilidad de las proteínas y palatabilidad (Dofing *et al.*, 1990; Tovar *et al.*, 1994; Zapotoczny *et al.*, 2006; Morales *et al.*, 2014). Con el grano reventado de amaranto se realizan palanquetas, granolas y harinas; con la harina se elaboran tortillas, productos de panificación, repostería, pastas para sopa, productos extruidos o papillas (Morales *et al.*, 2014). El uso de un lote de grano se determina dependiendo del volumen de reventado del grano obtenido. Por ejemplo, si el volumen de reventado es alto, es ideal para la fabricación de palanquetas y si el inflado es menor, el grano se puede utilizar en la elaboración de harinas o productos que no son afectados por la expansión del grano (Tavitas *et al.*, 2011).

El reventado de grano se realiza de manera artesanal mediante un comal de barro calentado con fuego y tiene rendimientos de 30 a 40 kg por jornada, también se realiza con una máquina reventadora que utiliza un sistema de lecho fluidizado de aire caliente y se puede obtener rendimiento de 80 a 160 kg ha⁻¹ (Muñoz *et al.*, 2005). El uso de la reventadora es el método común utilizado en la industria, debido a que es más eficiente en el volumen de expansión logrado y en la cantidad de grano reventado obtenido (Vázquez *et al.*, 1988; Murakami *et al.*, 2014).

El volumen de expansión de grano es afectado por diversos factores entre los que se encuentran el ambiente de cultivo, la variedad, el método de reventado y las condiciones de procesamiento (Mishra *et al.*, 2014; Ortiz-Torres *et al.*, 2018; Ramírez-Pérez *et al.*, 2018). En el grano las características importantes son el grosor y contenido de salvado, contenido de humedad, tipo de endospermo y características físicas del grano (Chen y Yeh, 2001; Mishra *et al.*, 2014).

En México, las entidades productoras más importantes ocupan parte de la cuenca de México, Hidalgo, Estado de México, Tlaxcala, Morelos, Puebla, Oaxaca y Michoacán, los rendimientos promedio son de entre 1 100 y 1 400 kg ha⁻¹. En cuanto a la producción nacional de amaranto, 51% de la producción se obtiene de Puebla, 22% de Morelos y el resto de Tlaxcala, Ciudad de México, Estado de México y Guanajuato (Morales *et al.*, 2014). En Puebla, el municipio con más superficie sembrada de amaranto en 2017 fue Tochmilco con 1 160 ha (SIAP, 2017). En esta zona se utilizan primordialmente poblaciones locales de amaranto.

En México no hay información suficiente sobre los factores que afectan la capacidad de volumen de expansión de las variedades de amaranto bajo cultivo. Tampoco existe una evaluación suficiente de la diversidad en la capacidad de reventado de grano de las poblaciones locales usadas.

El conocimiento de la diversidad en el volumen de expansión del grano permitirá hacer una selección de los mejores genotipos locales para un mejor aprovechamiento del grano. Los únicos reportes en México son de Ortiz-Torres *et al.* (2018) quienes evaluaron siete variedades mejoradas

de amaranto y dos poblaciones sobresalientes en cinco localidades de valles altos de Puebla y encontraron que el mejor genotipo fue la población local C2. En el estado de Tlaxcala Barrales-Domínguez y Torres-Hernández (1998) evaluaron 35 accesiones en dos localidades y encontraron 12 accesiones sobresalientes en volumen de grano reventado obtenido.

En el estado de Morelos Tavitas *et al.* (2011) evaluaron cinco variedades de amaranto de la especie *A. cruentus*, y encontraron que la variedad Amaranteca tuvo mayor rendimiento de grano reventado con 86.6% de eficiencia. Vázquez *et al.* (1988) estudiaron el comportamiento de 30 líneas de *A. hypochondriacus* y *A. cruentus* y encontraron líneas sobresalientes en volumen de reventado.

La selección y obtención de variedades con mayor volumen de expansión podría incrementar el precio de venta del grano debido a que se podría garantizar un mayor potencial en el volumen de reventado de grano y por lo tanto mayor cantidad de materia prima para la elaboración de los diferentes productos. El estudio se realizó en Tochimilco, Puebla, la zona con mayor superficie sembrada de amaranto en México, con el objetivo de evaluar el comportamiento del volumen de expansión de grano reventado de en 36 poblaciones locales y variedades mejoradas de amaranto.

Materiales y métodos

Se evaluaron 36 poblaciones y variedades mejoradas de amaranto. Las 30 poblaciones locales se fueron colectaron en los municipios de Tochimilco, Cohuecan y Huaquechula, Puebla, México durante el ciclo agrícola 2018. En el municipio de Tochimilco las colectas se realizaron en las siguientes localidades: en la cabecera municipal de Tochimilco se obtuvieron ocho accesiones, en San Miguel Tecuanipa seis, en Santiago Tochimilzolco cinco, en San Lucas Tulcingo cuatro, en la comunidad de San Felipe Cuapexco municipio de Cohuecan, se obtuvo una colecta y una en Santiago Tetla, municipio de Huaquechula. De las 30 poblaciones, 29 son de la especie *A. hypochondriacus* y solo la colecta C15 fue de la especie *A. cruentus*. Como testigos se incluyeron seis variedades mejoradas: Amaranteca, Benito, Nutrisol y Revancha del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y las variedades Laura y Gabriela del Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala (ITAT).

Las variedades Benito y Amaranteca son de la especie *A. cruentus* y se recomiendan para zonas semitropicales, el resto de las variedades mejoradas son recomendadas para valles altos y son de la especie *A. hypochodriacus* (Espitia *et al.*, 2010). Se establecieron cuatro ensayos durante 2015 y 2016 en San Lucas Tulcingo, San Miguel Tecuanipa, Santiago Tochimilzolco y Tochimilco todas pertenecientes al municipio de Tochimilco. La ubicación geográfica de los ensayos se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Localización geográfica de los sitios de ensayo de poblaciones y variedades de amaranto 2015 y 2016.

Localidad	Latitud	Longitud	Altitud (m)
San Lucas Tulcingo	18° 49' 02.2"	98° 37' 17.3"	2 061
San Miguel Tecuanipa	18° 88' 11.11"	98° 61' 91.67"	2 300
Tochimilco	18° 53' 03.5"	98° 32' 4.2"	1 961
Santiago Tochimilzolco	18° 51' 23.6"	98° 37' 25.2"	2 197

Tochimilco tiene un rango de temperatura de 02-20 °C, con una precipitación de 800-1 300 mm, presenta clima templado con lluvias en verano 69%, semifrío subhúmedo con lluvias en verano 24%, frío 5% y semicálido subhúmedo con lluvias en verano 2%.

En la zona se distingue el tipo de suelo regosol 30%), Phaeozem 24%, Andosol 19%, Cambisol 12%, Durisol 5%, Leptosol 4% y Fluvisol 3% (INEGI, 2010). En 2015 los ensayos se sembraron en San Lucas Tulcingo el 21 de junio y en San Miguel Tecuanipa el 06 de junio. En 2016 se establecieron en Tochimilco el 18 julio y en Santiago Tochimizolco el 17 junio.

En todas las localidades, la siembra se realizó de forma mateada cada 20 cm, en el lomo del surco. Se realizó un aclareo de plantas para dejar una población de 100 000 plantas ha⁻¹. El control de malezas se realizó en forma manual y con dos aporques. El primero se realizó cuando las plántulas alcanzaban de 10 a 15 cm de altura y el segundo cuando las plantas tenían de 30 a 40 días. Se utilizó una dosis de fertilización de 80N-40P-00K, aplicando todo en la primera labor. Los experimentos se condujeron en condiciones de temporal durante todo el ciclo de cultivo.

La unidad experimental consistió de dos surcos de 5 m de largo separados a 0.8 m. Se utilizó un diseño de látice cuadrado 6 x 6 con dos repeticiones en cada localidad. En campo se midieron las siguientes variables: rendimiento de grano (REN), es el peso de grano limpio al 10% de humedad y expresado en kilogramos por hectárea; días a floración media masculina (DFM), es el número de días transcurridos desde la siembra y hasta que 50% de la población presentó anthesis. También, en una muestra de cinco plantas se determinó: altura de planta (APL), que fue la distancia en centímetros del suelo a la punta de la espiga; peso hectolítrico (PHL), fue el volumen que ocupó la semilla en una jarra metálica de 100 ml y se registró en kilogramos por hectolitro y peso de mil semillas (PMS), que fue el peso en gramos de mil semillas.

La evaluación de la expansión de grano se realizó de acuerdo con la metodología propuesta por Ramírez-Pérez *et al.* (2018). Como primer paso se tomaron muestras de 15 g de grano crudo de cada parcela. A cada muestra se determinó del contenido de humedad por el método de la estufa (2 g de grano a 130 °C en la estufa de convención por 2 h).

Dependiendo del contenido de humedad de la muestra, se acondicionó con la adición el volumen de agua destilada requerido para que el grano alcanzara 12% de humedad, el agua se agregó con una jeringa de 1 ml. El acondicionamiento del grano se realizó 24 h antes del reventado. Después del acondicionamiento de grano, el reventado de las muestras se realizó en una máquina portátil de reventado de amaranto del Colegio de Postgraduados (Argumedo-Macías, 2019), la cual funciona por medio de lecho fluidizado con aire caliente. La temperatura del aire utilizada fue de 230-235 °C. Cada observación se hizo por duplicado.

Una vez obtenido el grano reventado se midieron las siguientes variables. Se consideró la Norma NMX-FF-116-SCFI-2010 que designa como grano reventado el grano que es retenido en una criba con abertura de 1.19 mm. Por lo cual, el grano ya reventado se pasó por el tamiz de pruebas físicas número 16 (Montinox, México), que tiene una abertura de 1.19 mm. Las variables que se determinaron fueron las siguientes: Peso de grano reventado (PRV), que es el peso (g) del grano reventado que quedó sobre el tamiz 16; volumen de expansión total de grano reventado (VTRV), que es el volumen (ml) del grano reventado que quedó sobre el tamiz 16, volumen de expansión de grano reventado (VEXP), que se calculó dividiendo el VTRV entre el peso original de la

muestra y se expresó en ml g^{-1} y rendimiento de grano reventado (RGRV), que se expresó como un porcentaje de peso y se calculó dividiendo el PRV entre el peso de la muestra y multiplicado por cien.

Volumen de expansión de grano reventado chico (VGC) es volumen del grano reventado que quedó sobre el tamiz 16 entre el peso de la muestra. Las últimas tres variables se expresaron en ml g^{-1} . El peso se registró con una balanza digital marca Ohaus y el volumen se midió con una probeta graduada de 10, 100 y 250 ml. Para detectar diferencias entre tratamientos en cada una de las variables estudiadas se realizó un análisis de varianza combinado y una prueba de medias con la prueba de Tukey. También, se determinó el coeficiente de correlación de Pearson (r), para determinar el grado de asociación entre las variables estudiadas. En el análisis se utilizó el procedimiento GLM del programa SAS versión 9.0 (SAS Institute, 2004).

Resultados y discusión

Los resultados del análisis de varianza combinado (Cuadro 2) muestra que en los factores de variación localidad y variedades hay diferencias estadísticas altamente significativas ($p \leq 0.01$) para todos los caracteres evaluados. En la interacción genotipo ambiente se encontraron diferencias estadísticas altamente significativas ($p \leq 0.01$) en casi todas las variables evaluadas, excepto en RGRV y PMS, en donde no hubo diferencias. Las diferencias estadísticamente significativas observadas entre genotipos y entre localidades indican diferencias importantes entre las poblaciones y entre las localidades de evaluación.

Cuadro 2. Cuadrados medios y significancia del análisis de varianza combinado y coeficiente de variación de las variables evaluadas en accesiones de amaranto en cuatro localidades de Tochimilco, Puebla, México. 2015 y 2016.

	Cuadrados medios				CV (%)
	Localidad	Variedad	Loc x Var	Error	
VEXP (ml g^{-1})	37.04 **	7.9 **	0.53 **	0.32	5.7
RGRV (%)	789.34 **	16.37 **	6.38 ns	5.85	2.9
PNRV (%)	73.75 **	3.8 **	2.38 **	1.45	46.1
VGC (ml g^{-1})	33.07 **	5.51 **	0.26 **	0.12	11.7
VGM (ml g^{-1})	28.76 **	8.38 **	0.66 **	0.31	11.3
VGG (ml g^{-1})	20.54 **	3.5 **	0.61 **	0.4	34.1
DFM	6 738.73 **	74.62 **	18.69 **	10.15	4
APL (cm)	60 602.92 **	1 234.79 **	354.96 **	213.32	10.2
PHL (kg hl^{-1})	46.06 **	11.06 **	1.75 **	1.22	1.3
PMS (g)	0.13 **	0.03 **	0 ns	0	3.8
REN (kg ha^{-1})	91 612.64 **	15 77.55 **	902.25 **	524.72	37.5

**= significativo al 0.01; *= significativo al 0.5 de probabilidad; ns= no significativo; Loc x Var= variedad por localidad; CV= coeficiente de variación; VEXP= volumen de expansión de grano reventado; RGRV= rendimiento de grano reventado; PNRV= porcentaje de grano no reventado; VGC= volumen de expansión de grano reventado chico; VGM= volumen de expansión de grano reventado mediano; VGG= volumen de expansión de grano reventado grande; DFM= días floración media; AP= altura de planta; PHL= peso hectolítrico; PMS= peso de mil semillas; REN= rendimiento de grano.

En el Cuadro 3 se presentan los promedios por localidad. Las localidades con mayor VEXP fueron Tochimilco y San Lucas Tulcingo. En segundo lugar, Tecuanipa y al final Tochimizolco. Barrales-Domínguez y Torres-Hernández (1998) considera que la capacidad del grano para reventar es un carácter de herencia cuantitativa por lo existe una gran influencia del ambiente sobre este carácter. En RGRV la localidad con más bajo rendimiento fue Tochimilco. La calidad por tamaño de grano expandido se comportó de la siguiente forma. Las localidades con mayor VGG y VGM fueron Tecuanipa y Tochimilco. Por otro lado, la localidad con mayor VGC fue San Lucas Tulcingo.

Cuadro 3. Promedios de las variables evaluadas en 36 accesiones de amaranto en cuatro localidades de Tochimilco, Puebla, México en 2015 y 2016.

LOC	VEXP (ml g ⁻¹)	PNRV (%)	RGRV (%)	VGC (ml g ⁻¹)	VGM (ml g ⁻¹)	VGG (ml g ⁻¹)	DFM	APL (cm)	PHL (kg hl ⁻¹)	PMS (g)	REN (kg ha ⁻¹)
TOC	10.3 a	4.1 a	79.2 b	2.7 c	5.2 ab	2.3 a	68.1 d	113.2 c	83.9 d	0.909 c	802 c
SLT	10.1 a	2 b	86.3 a	4 a	5 b	1.1 c	90.1 a	135.6 b	85.8 a	0.865 d	1125 b
TEC	10 b	2.2 b	85.8 a	2.4 d	5.4 a	2.2 a	78.4 c	141.7 b	84.7 c	0.967 a	2795 a
TZCO	8.7 c	2 b	85.4 a	3.0 b	4 c	1.8 b	85.9 b	182.7 a	85.2 b	0.927 b	3002 a
DHS	0.2	0.5	1	0.2	0.2	0.3	1.4	6.3	0.5	0.015	314

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). DSH= diferencia significativa honesta. LOC= localidad; TOC= Tochimilco; SLT= San Lucas Tulcingo; TEC= San Miguel Tecuanipan; TZCO= Tochimizolco; VEXP= volumen de expansión de grano reventado; RGRV= rendimiento de grano reventado, PNRV= porcentaje de grano no reventado; VGC= volumen de expansión de grano reventado chico; VGM= volumen de expansión de grano reventado mediano; VGG= volumen de expansión de grano reventado grande; DFM= días floración media; AP= altura de planta; PHL= peso hectolítrico; PMS= peso de mil semillas; REN= rendimiento de grano.

En características agronómicas también hubo diferencias entre localidades. En DFM la localidad de San Lucas Tulcingo fue la más tardía y en Tochimilco la más precoz. En APL Tochimizolco fue donde se presentaron las plantas más altas y Tochimilco las más bajas. En PHL los valores más altos fueron de Tulcingo y el más bajo de Tochimilco. En PMS el valor más alto fue en Tecuanipan y el más bajo en Tochimilco.

En rendimiento de grano el mayor valor fue en Tochimizolco y el menor en Tochimilco. Además, se observa que la localidad con mayor rendimiento Tochimizolco fue la de más bajo VEXP y al contrario la de menor rendimiento de grano Tochimilco fue la de más alto VEXP. Esta aparente contradicción entre rendimiento de grano y volumen de expansión ha sido reportada previamente por (Barrales-Domínguez y Torres-Hernández, 1989; Ortiz-Torres *et al.*, 2018).

En maíz palomero Dofing *et al.* (1990); Ceylan y Karababa (2002) reportaron que obtuvieron un mayor tamaño de grano reventado con granos crudos más grandes pero el volumen de expansión de una muestra de igual peso fue mayor con grano de tamaño chico que con grande y explican que se debió a que hay más número de grano chicos que grandes en una muestra de igual peso.

En el Cuadro 4 se presenta las medias de las variables evaluadas en los diferentes genotipos. En VEXP la media del grupo superior estuvo entre 9.5 a 10 ml g⁻¹. En el grupo superior estuvieron 22 de las 30 poblaciones evaluadas y las variedades mejoradas Laura y Gabriela. Además, destaca que los tres genotipos que pertenecen a la especie *A. cruentus*, las variedades Amaranteca y Benito y la población C15 mostraron los más bajos volúmenes de expansión con 7.8, 6.6, y 6.2 ml g⁻¹, respectivamente.

Cuadro 4. Promedios de las variables evaluadas en 36 accesiones de amaranto en cuatro localidades de Tochimilco, Puebla, México en 2015 y 2016.

Colecta	VEXP (ml g ⁻¹)	PNRV (%)	RGRV (%)	VGC (ml g ⁻¹)	VGM (ml g ⁻¹)	VGG (ml g ⁻¹)	DFM	APL (cm)	PHL (kg hl ⁻¹)	PMS (g)	REN (kg ha ⁻¹)
C2	10.6 a	2.3 a	84.7 a	2.3	5.4 a	2.9 a	80.8	155.5	85.6 a	0.951 a	2511 a
C9	10.5 a	2.3 a	84.8 a	2.3	5.5 a	2.8 a	83.6	152.1	85.8 a	0.941 a	1825 a
C18	10.5 a	3.3 a	83.9 a	2.6	5.6 a	2.4 a	81.3	141.6	84.9 a	0.936 a	2312 a
C3	10.5 a	2.2 a	85.7 a	2.4	5.7 a	2.4 a	81.9	148	85.5 a	0.934 a	1828 a
C6	10.4 a	2.3 a	85.2 a	2.5	5.6 a	2.3 a	83.3	149.7	86.1 a	0.945 a	1795 a
C12	10.4 a	2.2 a	83.8 a	2.5	5.6 a	2.3 a	83.1	141.7	85.4 a	0.95 a	1739 a
C24	10.4 a	2.5 a	84.4 a	2.6	5.6 a	2.1 a	81.3	142.1	85.5 a	0.948 a	1656 a
C11	10.4 a	2.3 a	85 a	2.5	5.6 a	2.3 a	83.5	163.2	85.2 a	0.939 a	2353 a
C10	10.3 a	2.2 a	85.4 a	2.6	5.5 a	2.3 a	81.8	154.2	85.3 a	0.92	2306 a
C7	10.3 a	2.4 a	84.6 a	2.6	5.5 a	2.2 a	82.9	152.7	85 a	0.931 a	2005 a
C1	10.3 a	2.6 a	85 a	2.6	5.6 a	2.1 a	80.8	150.2	85.2 a	0.931 a	1939 a
C4	10.3 a	2.7 a	84.2 a	2.3	5.6 a	2.4 a	81	152.3	85.2 a	0.961 a	1946 a
C21	10.2 a	1.9 a	84.6 a	2.9	5.7 a	1.6	82.5	143.2	84.8 a	0.911	1791 a
C14	10.2 a	2.4 a	84.5 a	2.5	5.2 a	2.5 a	82.3	149.8	85.3 a	0.953 a	2022 a
C8	10.2 a	2.1 a	85.4 a	2.6	5.2 a	2.4 a	81	148.8	85.3 a	0.945 a	1797 a
C27	10.1 a	2.4 a	83.9 a	4.3 a	4.5	1.3	84.1	132.8 a	85.2 a	0.789	1764 a
C5	10.1 a	2.6 a	83.3 a	2.4	5.4 a	2.3 a	82.8	150.8	85.1 a	0.981 a	1864 a
C19	10.1 a	2.1 a	84.7 a	2.7	5.6 a	1.8 a	80.6	160.7	85.1 a	0.947 a	2409 a
C29	10 a	2.6 a	83.8 a	3.2	5.1 a	1.7 a	80.9	149	85.9 a	0.872	1754 a
C28	10 a	2.7 a	84.6 a	2.5	5.5 a	2.1 a	79.8	142	85.6 a	0.984 a	1925 a
C23	10 a	2.3 a	84.9 a	2.7	5.3 a	1.9 a	80.6	145.5	85.5 a	0.968 a	2391 a
Laura	10 a	2.2 a	85.6 a	4.7 a	4.5	0.8	80.9	132.4 a	84.7 a	0.761	2643 a
C13	9.9 a	3.1 a	83.8 a	2.4	5	2.5 a	84.1	147.7	84.6 a	0.946 a	1623 a
Gabriela	9.9 a	2.1 a	85.1 a	4.7 a	4.4	0.8	77.9 a	113.3 a	85 a	0.779	1828 a
C20	9.9 a	2.1 a	86.7 a	2.9	5.2 a	1.8 a	79.6	137.8	85.2 a	0.946 a	2177 a
C16	9.9 a	2.4 a	84.4 a	2.6	5.5 a	1.8 a	82.9	146.9	85.6 a	0.928 a	2208 a
C25	9.8 a	2.6 a	84.3 a	2.7	5.4 a	1.7 a	82.5	151.4	84.9 a	0.95 a	2386 a
C30	9.7 a	2.3 a	84.6 a	4.1	4.2	1.4	81.5	135.1 a	85 a	0.798	2608 a
C22	9.5 a	2.3 a	84.1 a	3	5.2	1.3	80.9	149.3	85.1 a	0.931 a	2141 a
C26	9.5	3.4 a	82.3 a	2.7	4.7 a	2.1 a	82.3	149.9	85.5 a	0.958 a	1420 a
C17	9.4	2.1 a	83.4 a	2.3	5 a	2.1 a	80.1	150.5	85.6 a	0.994 a	2078 a
Revanch	9.3	4 a	82.7 a	2.6	4.4	2.3 a	73 a	107.7 a	83.4	0.948 a	1583 a
Nutrisol	8.9	2.4 a	84.3 a	4.9 a	3.1	0.8	75.3 a	137.4	84.5 a	0.787	2271 a
Benito	7.8	3.7 a	83.2 a	4.8 a	2.5	0.5	72.9 a	121.2 a	81.1	0.824	858

Colecta	VEXP (ml g ⁻¹)	PNRV (%)	RGRV (%)	VGC (ml g ⁻¹)	VGM (ml g ⁻¹)	VGG (ml g ⁻¹)	DFM	APL (cm)	PHL (kg hl ⁻¹)	PMS (g)	REN (kg ha ⁻¹)
Amaran	6.6	4.2 a	81.6	4.5 a	1.7	0.4	73.9 a	120.2 a	81.6	0.861	723
C15	6.2	5.1	78.1	3.6	2.1	0.5	74.5 a	132.2 a	81.4	0.956 a	1034
DHS	1.1	2.4	4.7	0.7	1.1	1.2	6.2	28.6	2.2	0.069	1421

a= medias pertenecientes al grupo superior estadísticamente ($p \leq 0.5$). DHS= diferencia significativa honesta. Revanch= Revancha; Amaran= Amaranteca; VEXP= volumen de expansión de grano reventado; RGRV= rendimiento de grano reventado; PNRV= porcentaje de grano no reventado; VGC= volumen de expansión de grano reventado chico; VGM= volumen de expansión de grano reventado mediano; VGG= volumen de expansión de grano reventado grande; DFM= días floración media masculina; APL= altura de planta; PHL= Peso hectolítrico; PMSM= peso de mil semillas; REN= rendimiento de grano.

En PNRV la población con el mayor promedio fue C15 con 5.1 g. Mientras que en RGRV se observó una variación de 78.1 a 86.7%. Las únicas variedades que no estuvieron en el grupo superior fueron Amaranteca y C15. El rendimiento de grano reventado observado está por debajo a lo obtenido por Tavitas *et al.* (2011) quienes reportaron rendimientos entre 83.3 y 86.6% en variedades de *A. cruentus*. En la calidad por tamaño de grano reventado destaca que 25 colectas sobresalieron en VGG y VGM. Sólo la variedad mejorada Revancha estuvo en el grupo superior en VGG. También, 24 colectas fueron sobresalientes en VGG y VGM al mismo tiempo.

Lo anterior muestra el potencial de las variedades locales de Tochimilco como fuente de germoplasma para seleccionar por VEXP. Obtener un alto volumen de expansión y de grano expandido de mayor tamaño grande es importante debido a que éste se asocia con un incremento en el volumen final y en la palatabilidad (Dofing *et al.*, 1990). Por otro lado, las colectas C21, C8 y las variedades Laura, Gabriela, Nutrisol, Benito y Amaranteca tuvieron el grupo con mayor cantidad de VGC.

En características agronómicas se observó variación entre genotipos en las características evaluadas. En REND tuvo un rango de 723 a 2 643 kg ha⁻¹ y sólo C15, Benito y Amaranteca no formaron parte del grupo superior. El bajo rendimiento de grano y VEXP refleja una falta de adaptación de estas variedades a las condiciones ambientales del municipio de Tochimilco. En DFM, el intervalo fue de 72.9 a 84.1 días. Si este periodo de 11.3 días se divide en tres partes. Se puede ver que 27 genotipos estuvieron en la porción más tardía, en este grupo la mayoría fueron poblaciones locales y la variedad Laura.

En la porción intermedia se ubicaron cuatro genotipos locales y la variedad Gabriela. En el extracto más precoz se ubicaron las variedades Nutrisol, Amaranteca, Revancha, Benito y la Colecta C15. Esta característica en estas variedades se explica porque fueron seleccionadas por su precocidad de para adaptarse a un rango ambiental amplio (Espitia *et al.*, 2010). En APL hubo una variación de 107.7 a 163.2 cm y casi todas las poblaciones locales estuvieron en el grupo con mayor altura junto con la variedad Nutrisol. Las plantas de menor altura fueron las variedades Amaranteca, Benito y Revancha, y las colectas C27, C30 y C15. En PHL todas las poblaciones locales y las variedades Laura, Gabriela y Nutrisol estuvieron en el grupo sobresaliente. En PMS, 25 poblaciones locales y la variedad Revancha estuvieron en el grupo superior.

En el Cuadro 5 se presentan las correlaciones entre las variables evaluadas. Se observa que VEXP correlacionó de forma positiva y estadísticamente significativa ($p \leq 0.01$) con variables que midieron la eficiencia en la cantidad de grano que reventó como RGRV ($r = 0.19^{**}$) y PNRV ($r = -0.22^{**}$). También; VEXP correlacionó de forma positiva y altamente significativa ($p < 0.01$) con variables relacionadas con la calidad por tamaño de grano reventado como VGM ($r = 0.85^{**}$) y VGG ($r = 0.55^{**}$), pero correlacionó negativamente con VGC ($r = -0.35^{**}$), por lo cual mayor VEXP se asoció con mayor volumen de grano reventado de tamaño grande y mediano y con menor porcentaje de grano no reventado (Dofing *et al.*, 1990; Soylu y Tekkanut, 2007).

Cuadro 5. Coeficientes de correlación lineal entre las variables evaluadas.

	PNRV	RGRV	VGC	VGM	VGG	DFM	APL	PHL	PMS	REN
VEXP	-0.22 **	0.19 **	-0.35 **	0.85 **	0.55 **	0.03 ns	-0.25 **	0.41 **	0.08 ns	-0.14 *
PNRV		-0.79 **	0.01 ns	-0.26 **	0.03 ns	-0.5 **	-0.41 **	-0.47 **	-0.05 ns	-0.41 **
RGRV			0.07 ns	0.17 **	-0.05 ns	0.61 **	0.4 **	0.42 **	0 ns	0.42 **
VGC				-0.57 **	-0.77 **	0.16 **	-0.21 **	-0.15 *	-0.85 **	-0.23 **
VGM					0.4 **	0.06 ns	-0.08 ns	0.44 **	0.36 **	-0.01 ns
VGG						-0.2 **	0.01 ns	0.11 ns	0.53 **	0.09 ns
DFM							0.51 **	0.53 **	-0.06 ns	0.21 **
APL								0.36 **	0.3 **	0.69 **
PHL									0.11 ns	0.28 **
PMS										0.25 **

** = significativo al 0.01 de probabilidad; * = significativo al 0.05 de probabilidad, ns = no significativo; VEXP = volumen de expansión de grano reventado; RGRV = rendimiento de grano reventado; PNRV = porcentaje de grano no reventado; VGC = volumen de expansión de grano reventado chico; VGM = volumen de expansión de grano reventado mediano; VGG = volumen de expansión de grano reventado grande; DF = días floración media masculina; APL = altura de planta; PHL = peso hectolítrico; PMS = peso de mil semillas; REN = rendimiento de grano.

VEXP se asoció de forma negativa y estadísticamente significativa ($p < 0.01$) con las variables agronómicas APL ($r = -0.25^{**}$) y REN ($r = -0.14^*$); pero positivamente con PHL ($r = 0.41^{**}$). El peso hectolitrico es una forma de evaluar la calidad de grano (Bern y Brumm, 2009), por lo cual con mayor PHL se nota una mejor respuesta en la calidad y cantidad de grano reventado.

En calidad de grano reventado por tamaño se observó que VGC correlacionó negativamente con variables VCM ($r = -0.57^{**}$) y VGG ($r = -0.77^{**}$) y es claro ya que son variables excluyentes, mayor volumen de grano reventado de tamaño chico se contrapone al volumen de grano mediano y grande. Asimismo, VGC correlacionó negativamente con variables agronómicas APL ($r = -0.21^{**}$), PHL ($r = -0.15^*$), PMS ($r = -0.85^{**}$) y correlacionó positivamente con DFM ($r = 0.16^{**}$). Se presentó mayor cantidad de grano reventado de tamaño pequeño con materiales de bajo PHL, PMS y ALP. Por su parte VGM se asoció positivamente con variables de reventado VGG ($r = 0.4^{**}$) y con variables agronómicas PHL ($r = 0.44^{**}$) y PMS ($r = 0.36^{**}$).

La variable REN correlacionó positivamente y significativa ($p \leq 0.01$) con variables que midieron el reventado PNRV ($r = -0.41^{**}$) y RGRV ($r = 0.42^{**}$) y negativamente con VGC ($r = -0.23^{**}$). Por lo que, materiales con un mayor porcentaje de grano de la muestra que reventó se asoció con un mejor rendimiento de grano. De la misma forma REN se asoció con las variables agronómicas DFM ($r = 0.21^{**}$), APL ($r = 0.69^{**}$) PHL ($r = 0.28^{**}$), PMS ($r = 0.25^{**}$), estas variables son indicadores del vigor de la planta y componentes de rendimiento. Por otro lado, DFM se asoció con variables agronómicas APL ($r = 0.51^{**}$) y PHL ($r = 0.53^{**}$). Plantas más tardías presentaron mayor altura de planta y peso hectolítrico. Finalmente, APL correlacionó positivamente con las variables agronómicas PHL ($r = 0.36^{**}$) y PMS ($r = 0.3^{**}$).

Por otro lado, el peso de mil semillas puede ser útil para predecir el tamaño del grano reventado que se obtendrá; debido que PMS correlacionó positivamente con VGG ($r = 0.53^{**}$), VGM ($r = 0.36^{**}$) y correlacionó de forma negativa y altamente significativa con VGC ($r = -0.85^{**}$). Es decir, con granos de mayor peso se obtuvieron mayor rendimiento de grano expandido de tamaño grande y mediano. En maíz palomero Soyly y Tekkant (2007) evaluaron tres tamaños de grano y encontraron que granos grandes dan un grano reventado más grande comparado con granos chicos. Por su parte Song *et al.* (1991) encontraron al evaluar cinco tamaños de grano en cuatro genotipos que los granos de tamaño medio presentaron mayor volumen de reventado. En amaranto. Vázquez *et al.* (1988) encontraron que grano con mejor peso tiene mayor volumen de reventado.

Conclusiones

Se observaron entre variedades diferencias estadísticas altamente significativas ($p \leq 0.01$) para los caracteres evaluados, lo que indican diferencias importantes entre las poblaciones evaluadas. En volumen de expansión, el rango de variación fue de 6.2 a 10.6 ml g⁻¹, el grupo superior lo formaron 22 de 30 poblaciones locales evaluadas y las variedades mejoradas Laura y Gabriela.

En la calidad por tamaño de grano reventado destaca que 24 colectas y ninguna variedad mejorada fueron sobresalientes al mismo tiempo en tamaño reventado grande y mediano. Lo anterior, muestra el potencial de las poblaciones locales de Tochimilco como fuente de germoplasma para seleccionar por volumen de expansión.

El peso hectolítrico y peso de mil semillas son características que se asocian al comportamiento del volumen de expansión y al tamaño de grano reventado. Un mayor PHL se asoció con mayor volumen de grano reventado ($r = 0.41^{**}$), mayor proporción de tamaño reventado mediano ($r = 0.44^{**}$) y mejor rendimiento de reventado RGRV ($r = 0.42^{**}$). También, mayor peso de grano se correlacionó con mayor rendimiento de grano expandido de tamaño grande ($r = 0.53$) y mediano VGM ($r = 0.36$).

Literatura citada

- Argumedo, M. A. 2019. Reventadora de semilla de amaranto (*Amaranthus* sp). Agroproductividad. 12(11):111-113. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi0.1541>.
- Barrales, D. J. S. y Torres, H. L. 1998. Capacidad de reventado del grano de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) producido en dos ambientes de temporal. Rev. Chapingo Ser. Hortic. 4(1):63-66.
- Espitia, R. E.; Escobedo, L. D.; Mapes, S. C.; De la O, O. M.; Aguilar, D. M.; Hernández, J. M.; Ayala, A. V.; Rivas, V. P.; Martínez, T. G.; Ramírez, V. M. y Morán, S. H. 2012. Conservación de los recursos genéticos de amaranto (*Amaranthus* spp.) en México. In: Espitia, R. E. (Ed.). Amaranto: Ciencia y Tecnología. INIFAP/SINAREFI. Libro científico núm. 2. Celaya, Guanajuato, México. 147-163 pp.
- Espitia, R. E.; Mapes, S. C.; Escobedo, L. D., De la O, O. M.; Rivas, V. P.; Martínez, T. G.; Cortés, E. L. y Hernández, J. M. 2010. Conservación y uso de los recursos genéticos de amaranto en México. SINAREFI-INIFAP-UNAM. Celaya, Guanajuato, México. 101 p.
- Córdova, T. L.; Vásquez, V. M. y Rosario, R. J. 2019. Catálogo nacional de variedades vegetales 2019. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Edición 2019. Ciudad de México. México. 106 p.
- Ceylan, M. and Karababa, E. 2002. Comparison of sensory properties of popcorn from various types and sizes of kernel. J. Sci. Food Agric. 82(1):127-133.
- Chen, C. M. and Yeh, A. I. 2001. Effect of amylose content on expansion of extruded rice pellet. Cereal Chemistry. 78(3):261-266.
- De la O, O. M.; Espitia, R. E.; Ayala, A. V.; Hernández, J. M.; Arellano, J. L. y Ruiz, V. C. 2012. Caracterización del germoplasma para grano de amaranto (*Amaranthus* spp.). In: Espitia, E. (Ed.). Amaranto: ciencia y tecnología. INIFAP/SINAREFI. Libro científico núm. 2. Celaya, Guanajuato, México. 165-181 pp.
- Dofing, S. M.; Thomas, C. M. A. and Buck, J. S. 1990. Genotype X popping method interaction for expansion volume in popcorn. Crop Sci. 30(1):62-65.
- Escobedo, L. D.; Ayala, A. V. y Campos, S. G. 2012. Formas de consumo del amaranto en México. In: Espitia, E. (Ed.). Amaranto: ciencia y tecnología. INIFAP/SINAREFI. Libro científico núm. 2. Celaya, Guanajuato, México. 341-354 pp.
- INEGI. 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Tochimilco, Puebla. Clave geoestadística. 21188. 1-10 pp.
- Mishra, G.; Joshi, D. C. and Panda, B. K. 2014. Popping and puffing of cereal grains: a review. J. Grain Processing Storage. 1(2):34-46.
- Moreno, M. G.; Herrera, T. S.; Licea, E. M. y De la O, O. M. 2015. Comparación entre el uso de aire caliente y microondas sobre la capacidad de reventado de semilla en cuatro variedades de Amaranto (*Amaranthus* sp.). Rev. Ingeniantes. 1(2):40-44.
- Murakami, T.; Yutani, A.; Yamano, T.; Iyota, H. and Konishi, Y. 2014. Effects of popping on nutrient contents of amaranth seed. Plant foods for human nutrition. 69(1):25-29. <https://doi.org/10.1007/s11130-013-0392-7>.
- Norma Mexicana NMX-FF-114-SCFI. 2009. Grano de amaranto (*Amaranthus* spp.) para uso y consumo humano, especificaciones y métodos de ensayo. SAGARPA-DGN. México, DF. 36 p.

- Mapes, S. C.; Díaz, O. A. y Blancas, J. 2012. Caracterización de germoplasma de amaranto (*Amaranthus* spp.) para verdura. *In*: Espitia, R. E. (Ed.). Amaranto: ciencia y tecnología. INIFAP/SINAREFI. Celaya, Guanajuato, México. Libro científico núm. 2. 183-201 pp.
- Muñoz, G. F.; Gaytán, J. G.; Lugo, A. M.; Martínez, R. J. y Flores, J. E. 2005. Fabricación de una máquina para reventar granos de amaranto. *Rev. Cienc. Téc. Agropec.* 14(4):1-8.
- Ortiz, T. E.; Argumedo, M. A.; García, P. H.; Meza, V. R.; Bernal, M. R. y Taboada, G. O. R. 2018. Rendimiento y volumen de expansión de grano de variedades mejoradas de amaranto para valles altos de Puebla. *Rev. Fitotec. Mex.* 41(3):291-300. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/610/61059021009/61059021009.pdf>.
- Ramírez, P. A.; Ortiz, T. E.; Argumedo, M. A.; de la O-Olán, M.; Jacinto, H. C.; Ocampo, F. I y Díaz, R. R. 2018. Método para evaluar reventado de grano en amaranto. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 9(3):675-682. Doi: 10.29312/remexca.v9i3.1224.
- Ruíz, V. C.; De la O, O. M.; Espitia, R. E.; Sangerman, J. D. M.; Hernández, J. M. y Scwentesi, R. R. 2013. Variabilidad cualitativa y cuantitativa de accesiones de amaranto determinada mediante caracterización morfológica. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 4(5):789-801. <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263127573011.pdf>.
- SAS Institute 2004. SAS/SATA 9.9. User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, NC. 1731-1900 pp.
- SIAP. 2017. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA. Ciudad de México. <http://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>.
- Song, A.; Eckhoff, S. R.; Paulsen, M. and Litchfield, J. B. 1991. Effects of kernel size and genotype on popcorn popping volume and number of unpopped kernels. *Cereal Chemistry.* 68(5):464-467.
- Soylu, S. and Tekkanat, A. 2007. Interactions amongst kernel properties and expansion volume in various popcorn genotypes. *J. Food Eng.* 80(1):336-341.
- Tavitas, F. L.; Valle, V. M. y Hernández, R. L. 2011. Determinación de la calidad del grano reventado y contenido de aceite en cinco variedades de amaranto. Campo Experimental Zacatepec- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Folleto técnico núm. 53. México, DF. 34 p.
- Zapotoczny, P.; Markowski, M.; Majewska, K.; Ratajski, A. and Konopko, H. 2006. Effect of temperature on the physical, functional, and mechanical characteristics of hot-air-puffed amaranth seeds. *J. Food Eng.* 76(4):469-476. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.05.045>.