



RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL MAÍZ TUXPEÑO V-520C ADAPTADO CON SELECCIÓN MASAL A VALLES ALTOS, MÉXICO

YIELD AND QUALITY OF TUXPEÑO V-520C MAIZE ADAPTED THROUGH MASS SELECTION TO HIGHLANDS, MEXICO

Fernando López-Morales^{1,3}, Ma. Gricelda Vázquez-Carrillo^{2*}, J. Jesús García-Zavala³, Delfino Reyes-López⁴, Olga Bonilla-Barrientos³, Gilberto Esquivel-Esquivel², Ligia García⁵, Gregorio Hernández-Salinas⁶, Genaro Pérez-Jiménez⁷, Lusmila Herrera-Pérez⁸ y José D. Molina-Galán^{3†}

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), EcoCampus Valsequillo, San Pedro Zacachimalpa, Puebla, México. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Valle de México, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. ³Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. ⁴BUAP, Facultad de Ingeniería Agrohidráulica, San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. ⁵Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva, Amazonas, Perú. ⁶Tecnológico Nacional de México, Campus Zongolica, Tepetitlanapa, Zongolica, Veracruz, México. ⁷INIFAP, Campo Experimental San Martinito, Santa Rita Tlahuapan, Puebla, México. ⁸Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Facultad de Ingeniería Ambiental, Puebla, Puebla, México.

*Autor de correspondencia (gricelda_vazquez@yahoo.com)

RESUMEN

En el Estado de México, como en otras regiones de temporal de la república mexicana, los productores prefieren semilla de maíz nativo (*Zea mays* L.) por su adaptación a las condiciones de secano y por sus características para el procesamiento del nixtamal y elaboración de tortillas. El objetivo del presente estudio fue evaluar el rendimiento, la calidad de grano, y la elaboración de nixtamal y tortilla de la variedad Tuxpeño V-520C adaptada a Valles Altos mediante selección masal visual (SMV) utilizando los ciclos C0, C14, C19 y el Compuesto Universal de la raza Chalqueño como testigo, en el Estado de México. Se realizaron tres experimentos en tres ambientes con diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se evaluó el rendimiento y las características de calidad del grano y tortillas bajo el método tradicional. Se realizó análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) entre los genotipos. Se encontró significancia ($P \leq 0.05$) entre ambientes, genotipos y en la interacción genotipo-ambiente para la mayoría de las variables. La SMV incrementó la adaptación a Valles Altos. El maíz Tuxpeño V-520C incrementó el rendimiento hasta en 67 % ($C0 = 1.46$ vs. $C19 = 4.46$ t ha⁻¹) y mejoró la calidad de grano y de tortilla conforme avanzó la SMV. El maíz Tuxpeño C19 adaptado a Valles Altos registró el menor índice de flotación (41, siendo el más duro), mayor peso hectolítrico (75.5 kg hL⁻¹) y mayor rendimiento de tortilla (1.42 kg kg⁻¹ de grano), las cuales también fueron de textura más suave con respecto al testigo. El maíz del C19 podría representar una alternativa para los productores e industrias, ya que cuenta con las mejores características de calidad de grano para nixtamalización y tortilla.

Palabras clave: *Zea mays*, adaptación, calidad de grano y tortilla, Chalqueño, selección, Tuxpeño.

SUMMARY

In the State of Mexico, as in other rainfed regions of the Mexican republic, farmers prefer native maize (*Zea mays* L.) seed for its adaptation to rainfed conditions and its characteristics for nixtamal processing and making tortillas. The objective of this study was to evaluate yield, grain quality and the elaboration of nixtamal and tortilla of the Tuxpeño V-520C variety adapted to highlands through visual mass selection (VMS) using cycles C0, C14, C19 and Compuesto Universal of the Chalqueño race, as a control, in the State

of Mexico. Three experiments were carried out in three environments with a randomized complete block design with three replications. Yield and quality characteristics of the grain and tortilla elaborated under the traditional method were evaluated. Analysis of variance and comparison of Tukey means ($P \leq 0.05$) between genotypes were performed. Significance ($P \leq 0.05$) was found among environments, genotypes and in genotype-by-environment interaction for most of the traits. The VMS increased adaptation to highlands. Tuxpeño V-520C maize increased yield up to 67 % ($C0 = 1.46$ vs. $C19 = 4.46$ t ha⁻¹) and improved the quality of grain and tortilla as the VMS progressed. The Tuxpeño C19 maize adapted to highlands showed the lowest flotation index (41, being the hardest), the highest test weight (75.5 kg hL⁻¹) and the highest tortilla yield (1.42 kg kg⁻¹ of grain), which were also softer in texture compared to the control. Maize of C19 could represent an alternative for producers and industries, since it has the best quality characteristics of grain for nixtamalization and tortilla.

Index words: *Zea mays*, adaptation, grain and tortilla quality, Chalqueño, selection, Tuxpeño.

INTRODUCCIÓN

En México, el maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo con mayor superficie sembrada (alrededor de 8 millones de hectáreas) y aproximadamente el 72 % de la producción nacional (18 millones de toneladas) se destina para el consumo humano en forma directa como tortilla, que generalmente procede de maíz blanco (Imagen Agropecuaria, 2020; Com. Pers.)¹. La elaboración de tortilla se realiza mediante diferentes procedimientos; por ejemplo, el tradicional (maíz-masa-tortilla), que puede producir tortillas a partir de masa fresca o bien mezclarla con harina nixtamalizada (Jiménez-Juárez et al., 2012).

¹Imagen Agropecuaria (2020) México sigue rompiendo récord en importación de maíz amarillo. Imagen Agropecuaria. Ciudad de México. <http://imagenagropecuaria.com/2020/mexico-sigue-rompiendo-record-en-importacion-de-maiz-amarillo/> (Mayo 2020).

En el Estado de México se produjeron en el año 2019 1.1 millones de toneladas de maíz, de las cuales el 23.6 % fueron bajo riego y el 76.4 % restante se produjo en seco, con un rendimiento promedio de 3.7 t ha⁻¹ en ambos sistemas de producción de maíz (SIAP, 2020). En esta entidad, como en otras regiones de temporal del país, los productores prefieren semilla de maíces nativos por su amplia adaptación a los ambientes locales y por la facilidad y gusto gastronómico para el procesamiento de nixtamal para la elaboración de tortillas, atributos culinarios que también están ligados a los aspectos culturales (Iuga *et al.*, 2019).

De acuerdo con López-Morales *et al.* (2020) y Santiago-López *et al.* (2020), las razas de maíz presentan problemas de adaptación cuando se siembran fuera de su ambiente, lo que limita los programas de mejora genética para producir nuevas variedades e híbridos, por lo que se debe propiciar el avance y mejoramiento de razas localmente adaptadas, como Tuxpeño en el trópico húmedo, Celaya y Cónico Norteño en el Bajío, Chalqueño y Cónico en Valles Altos, aunque también se debe favorecer la adaptación de materiales exóticos, como las razas Tuxpeño, Nal-Tel y Olotillo a Valles Altos de México (> 2200 msnm) (Pérez *et al.*, 2002).

En la adaptación de materiales introducidos en nuevos ambientes, Goodman (2002) sugiere un proceso de selección de años consecutivos hasta lograr avances de adaptación a nuevos ambientes. Molina (1983) utilizó la selección masal visual (SMV) para la adaptación de germoplasma de maíz tropical y subtropical a clima templado (Pérez *et al.*, 2002; Pérez-Colmenárez *et al.*, 2007). El resultado de dicha metodología fue la adaptación de la raza Tuxpeño originaria de Veracruz (0 a 500 msnm) a Valles Altos de México bajo el método de SMV (Martínez *et al.*, 1990; Pérez-Colmenárez *et al.*, 2000).

En México, la calidad comercial del grano está definida en las normas mexicanas para maíz NMX-FF-034/1-2002-SCFI-2002 (SE, 2002); sin embargo, las industrias productoras de harina nixtamalizada y de masa-tortilla tienen sus especificaciones para los maíces que procesan (Salinas *et al.*, 2012), por lo cual es muy importante producir y contar con materiales que cumplan tales especificaciones.

La adaptación de germoplasma exótico por el método de SMV a través de varios ciclos de selección se fundamenta en la transmisión de características similares o superiores de los materiales locales (Pérez *et al.*, 2002; Pérez-Colmenárez *et al.*, 2000; 2007). La variedad V-520C de la raza Tuxpeño fue seleccionada durante 19 ciclos de SMV en los Valles Altos de México para su adaptación

bajo el criterio de seleccionar plantas con mazorcas rendidoras y sanas, típicas de Tuxpeño (Molina, 1983).

El objetivo del presente estudio fue evaluar germoplasma de los ciclos 14 y 19 de la variedad Tuxpeño V-520C obtenidos por SMV, junto con el material original y la variedad Compuesto Universal de la raza Chalqueño en el Estado de México para rendimiento, características de calidad de grano, nixtamalización y tortilla. La hipótesis fue que el ciclo más avanzado en la SMV de la raza Tuxpeño adaptado a Valles Altos tendría mayor rendimiento y cumpliría con las características de calidad de grano, nixtamalización y tortilla requeridas por las industrias procesadoras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético

La variedad de maíz V-520C ciclo cero (C0) de la raza Tuxpeño, seleccionada mediante SMV durante 19 ciclos en el Estado de México (Molina, 1983), dio origen a los ciclos C14 y C19 de SMV. Se incluyó como testigo el material local Compuesto Universal (CU) de la raza Chalqueño con 12 ciclos de selección masal. La selección se hizo considerando aspectos de la mazorca (tamaño, forma, sanidad, hileras rectas, color y tipo de grano) y planta (sanidad, vigor, sin acame y forma de planta) típicas de la raza Tuxpeño. La SMV hasta C19 se llevó a cabo entre los años 1989-2008, dirigida por el Dr. José D. Molina-Galán, en el Campo Agrícola Experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo (19° 27' LN y 98° 54' LO), en Texcoco, Estado de México, con clima templado subhúmedo (García, 1973) y una altitud de 2250 msnm.

Ubicación de los experimentos

Los ciclos C0, C14 y C19 de SMV y el testigo CU se evaluaron en los ciclos primavera-verano 2013 y 2014 en Montecillo (M-2013 y M-2014) a una altitud de 2250 m, con suelo tipo Vertisol con un pH de 7.5, y 2014 en Coatlinchán (C-2014) a 2300 msnm con suelo del tipo Phaeozem con pH 6.2, ambas localidades del municipio de Texcoco, Estado de México, con clima templado subhúmedo.

Diseño y unidad experimental

El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar con tres repeticiones (Martínez, 1988), la unidad experimental consistió de dos surcos de 6 m de longitud, separados a 80 cm, sembrando dos semillas cada 50 cm, equivalente a una densidad de población de 50 mil plantas por hectárea.

Manejo agronómico de los ensayos

Las fechas de siembra para los dos experimentos en Montecillo fueron el 21 del mayo y 5 de junio de 2013 y 2014, respectivamente; mientras que en Coatlinchán fue el 9 de mayo de 2014. La fórmula de fertilización empleada en los dos ciclos de evaluación en Montecillo (M-2013 y M-2014) fue 140N-60P-00K; en Coatlinchán (C-2014) se aplicó la fórmula 140N-40P-00K. En los tres ambientes, la mitad del nitrógeno y todo el fósforo se aplicaron al momento de la siembra de manera manual y la otra mitad de nitrógeno se aplicó 35 días después de la siembra. En los tres ambientes se utilizó un riego inicial con 10 cm de lámina para la germinación, y en los dos ciclos de Montecillo se dieron tres riegos de auxilio con 5 cm de lámina (antes y durante floración), siendo todos los riegos de tipo rodado. Durante todo el ciclo del cultivo se registraron las precipitaciones y temperaturas medias (Figura 1). El control de malezas se realizó con los herbicidas dicamba, atrazina, terbutrina, paraquat y nicosulfurón en la segunda labor cultural, con dosis de 0.5, 1.5, 1.0, 1.5 y 0.05 kg ha⁻¹, respectivamente, de acuerdo con la recomendación de los fabricantes para el cultivo de maíz.

Variables evaluadas

El rendimiento (REN) se obtuvo utilizando el peso seco de mazorca por cada unidad experimental, ajustado a 14 % de humedad del grano y se expresó en t ha⁻¹ (Vázquez *et al.*, 2012a). Las características de calidad de grano, nixtamalización y tortilla se realizaron de acuerdo con el proceso descrito por Vázquez-Carrillo *et al.* (2016) con el método tradicional (maíz-masa-tortilla) para elaborar tortilla en el Laboratorio de Calidad de Maíz del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Las características físicas evaluadas fueron peso hectolítrico (PH en kg hL⁻¹), índice de flotación (IF), que es una medida indirecta de la dureza del grano, descrito en la norma NMX-FF-034/1-2002-SCFI-2002 (SE, 2002). Se registró el peso de cien granos (PCG en g) con tres determinaciones para calificar el tamaño del grano (Salinas-Moreno y Aguilar-Modesto, 2010).

En la nixtamalización, los tiempos de cocción se asignaron con base en el IF: el C0 y CU recibieron 30 min de cocción por tratarse de granos suaves, mientras que C14 y C19 requirieron 35 min por ser granos intermedios (López-Morales *et al.*, 2017; 2019). En el licor de cocción (nejayote) se evaluó la pérdida de materia seca (PMS), y en el nixtamal el pericarpio retenido (PR) y su humedad (HN). En tortillas se determinó la humedad (HT en %), el rendimiento (RT) expresado como kg de tortillas por kg de grano procesado (kg kg⁻¹) y la fuerza de ruptura

y elongación en tortillas empacadas y almacenadas durante 24 h a 4 °C, siguiendo los métodos descritos por Salinas y Vázquez (2006). La fuerza de ruptura (gramos-fuerza, g_f) y la elongación (mm) en las tortillas se midieron con un texturómetro (Brookfield® Modelo CT3, Middleboro, Massachusetts, EUA) usando un punzón con una esfera de 10 mm de diámetro. La cuantificación de proteína en grano crudo (ProG) y tortilla (ProT) se realizó siguiendo el método 46-11A de la AACC (2010).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza combinado a través de ambientes por cada variable evaluada. La comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); así mismo, se llevó a cabo un análisis de correlación de Pearson con todas las variables evaluadas. Todos los análisis se realizaron con el paquete estadístico SAS® versión 9.0 (SAS Institute, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza detectó significancia ($P \leq 0.01$) en las fuentes de variación ambientes (A), genotipos (G) e interacción genotipo-ambiente (IG \times A) para la mayoría de las variables estudiadas (Cuadro 1). Entre ambientes (M-2013, M-2014 y C-2014) no hubo significancia para REN y ProT, lo que indica que los A de estudio no afectaron estos parámetros, lo que pudo deberse a la similitud de temperaturas medias y la cercanía de los mismos (López-Morales *et al.*, 2020). Entre genotipos hubo significancia para todas las variables estudiadas (Cuadro 1), lo que denota que la selección masal visual (SMV) indujo cambios a nivel genético para la adaptación en los ambientes de Valles Altos, por lo que hubo diferencias entre los genotipos de maíz Tuxpeño y el CU de la raza Chalqueño; resultados similares fueron encontrados por Pérez *et al.* (2002), Pérez-Colmenárez *et al.* (2007) y López-Morales *et al.* (2020). La IG \times A resultó significativa para seis de las 13 variables, lo que puede deberse a que existen respuestas más consistentes de algunos parámetros a través de ambientes y a la semejanza agroclimática (Figura 1) de los ambientes de estudio. Así mismo, en el análisis de varianza se identificó significancia para todas las variables evaluadas en la fuente de genotipos, lo cual coincide con lo informado por Antuna *et al.* (2008) y Vázquez *et al.* (2010) al evaluar genotipos diferentes a los de esta investigación.

Rendimiento de grano

Existió significancia ($P \leq 0.01$) para REN entre genotipos y en la IG \times A en el análisis de varianza (Cuadro 1). El no encontrar significancia entre los ambientes significa

que las condiciones ambientales promedio fueron muy similares entre ellos, los cuales son muy cercanos entre sí, con similares altitudes y temperaturas (Figura 1), aunque con diferente tipo de suelo, pH y precipitación. En tanto, se infiere que la significancia de la IG × A fue causada por los genotipos a través de ambientes de evaluación, tal como sucedió en los resultados de López-Morales *et al.* (2020) para la variable rendimiento en Valles Altos.

La prueba de comparación de medias (Tukey, $P \leq 0.05$) entre genotipos mostró que el testigo CU localmente adaptado tuvo el rendimiento de grano promedio más alto, mientras que el C0 fue el de menor rendimiento (Cuadro 2) por estar desadaptado. Lo anterior indica que la SMV produjo cambios en la variedad Tuxpeño V-520C, debido a que se logró un aumento en el rendimiento de 67.0 % entre C0 y C19; se infiere que el C19 presenta mayor frecuencia de genes favorables con base en su rendimiento y adaptación a las condiciones ambientales de los Valles Altos. Resultados similares fueron encontrados en los mismos genotipos por Pérez *et al.* (2002), Pérez-Colmenárez *et al.* (2007) y López-Morales *et al.* (2017; 2019); sin embargo, el Tuxpeño más avanzado fue superado por el testigo CU de la raza Chalqueño, lo que pudo deberse a que este genotipo ya está localmente adaptado a Valles Altos de México y Tuxpeño todavía requiere de más ciclos de adaptación; en contraste con lo anterior, los resultados obtenidos por Martínez *et al.* (1990) y Pérez-Colmenárez *et al.* (2000),

quienes evaluaron en la misma zona y con la variedad Tuxpeño Crema 1, y Pérez-Colmenárez *et al.* (2007) con Tuxpeño V-520C (misma que se evaluó en este estudio), se encontró similitud en el rendimiento de mazorca por planta entre CU y los ciclos C11, C12 y C8 de SMV; también, se encontró semejanza con los resultados de Pérez *et al.* (2002), quienes utilizaron la variedad V-520C con diferentes años de SMV, donde el CU también fue superior en rendimiento a los genotipos inferiores al ciclo nueve (C9) de SMV.

El REN en los dos ciclos (C14 y C19) del maíz Tuxpeño con respecto al C0, muestra un claro incremento por efecto de la SMV; así, el C19 tuvo el mayor REN (4.43 t ha⁻¹), superando la media de rendimiento del Estado de México (3.7 t ha⁻¹). Este promedio fue menor al del testigo CU (6.79 t ha⁻¹) (Cuadro 2), pero coincide con el resultado de Martínez *et al.* (1990) y el de Pérez-Colmenárez *et al.* (2000), quienes utilizaron la SMV en la variedad Tuxpeño Crema 1 (formado por ocho variedades), y el de Pérez *et al.* (2002) y Pérez-Colmenárez *et al.* (2007) con V-520C, cuyas evaluaciones para rendimiento se realizaron en Valles Altos de México, donde tal selección produjo efectos significativos entre los ciclos C0 y del C2 al C11, C12, C9 y C8, respectivamente, de los autores mencionados anteriormente.

Cuadro 1. Análisis de varianza para rendimiento, características de calidad de grano, nixtamalización y tortilla de la variedad V-520C en C0, C14, C19 y CU (2013-2014).

Variables	Cuadrados medios				CV (%)	R ²
	Ambientes	Genotipos	IG × A	Error		
Rendimiento de grano	0.31ns	49.12**	17.61**	1.74	34.67	0.89
Peso hectolítrico	93.70**	81.37**	2.34ns	1.19	1.50	0.95
Índice de flotación	2861.08**	2217.21**	233.49**	40.23	11.24	0.95
Peso de cien granos	126.61**	229.36**	25.53**	5.64	9.43	0.91
Pérdida de materia seca	3.61**	1.17**	0.32 *	0.11	7.60	0.86
Pericarpio retenido	1532.60**	897.70**	43.83ns	26.13	11.78	0.92
Humedad de nixtamal	12.66**	17.62**	2.86ns	1.61	2.49	0.77
Humedad de tortilla	54.35**	8.45 *	1.15ns	2.70	3.67	0.77
Elongación 24h	0.26**	1.87**	0.26**	0.05	4.41	0.89
Fuerza de ruptura a 24h	11320.75**	4689.22 *	913.30ns	1376.63	15.13	0.67
Proteína de grano	6.43**	3.20 *	0.47ns	0.77	8.22	0.70
Proteína de tortilla	0.82ns	1.55**	0.24ns	0.36	6.25	0.78
Rendimiento de tortilla	0.013**	0.023**	0.006 *	0.002	3.30	0.78

** , * , ns: $P \leq 0.01$, $P \leq 0.05$ y no significativo, respectivamente, A: ambientes, G: genotipos, IA × G: interacción genotipo por ambiente, CV: coeficiente de variación, R²: coeficiente de determinación.

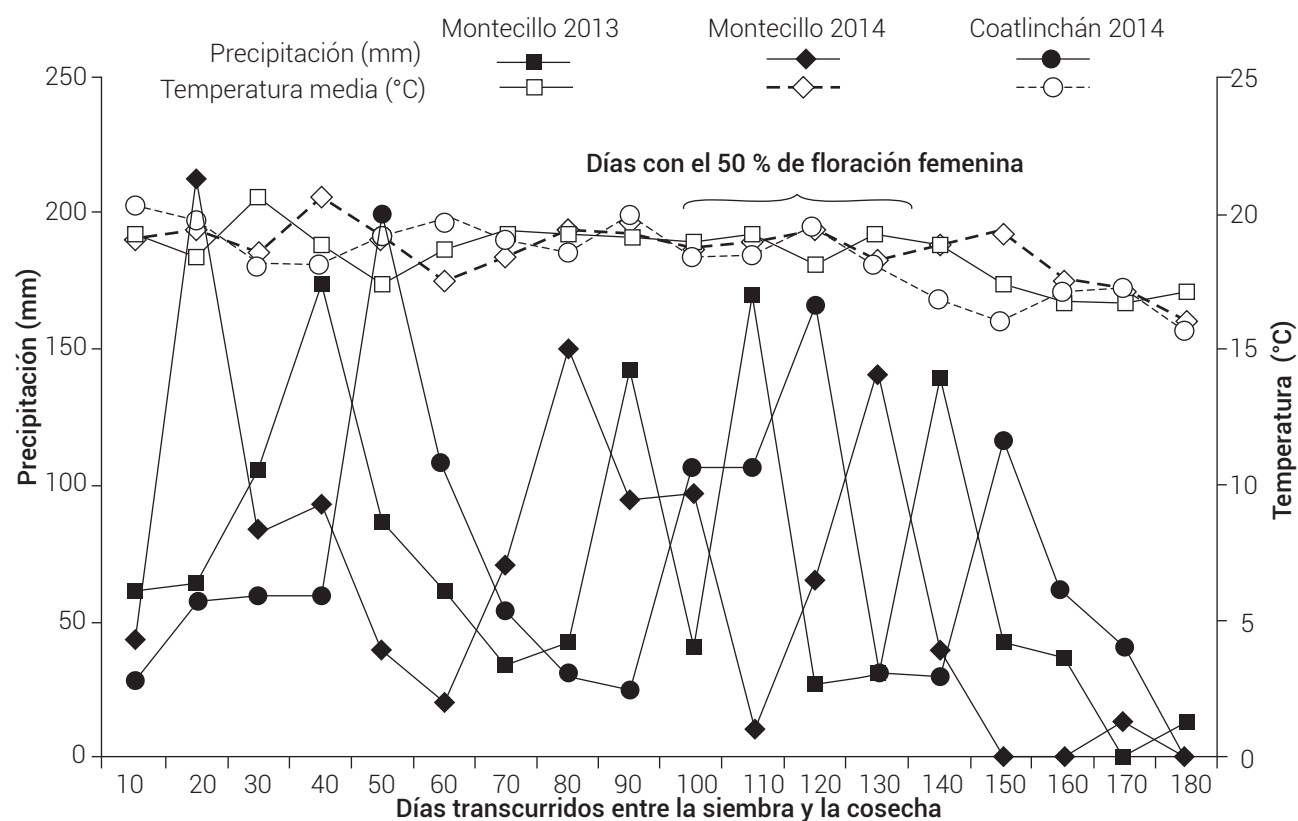


Figura 1. Precipitación y temperaturas medias de los tres ambientes de evaluación en Valles Altos de México (2013-2014).

Cuadro 2. Rendimiento, características de calidad de grano, nixtamal y tortilla en la variedad V-520C en C0, C14, C19 y CU (2013-2014).

G	REN (t ha ⁻¹)	Características de calidad											
		Grano			Nixtamal			Tortilla					
		PH (kg hL ⁻¹)	IF (%)	PCG (g)	PMS (%)	PR (%)	HN (%)	HT (%)	EL24 (mm)	FR24 (g _r)	ProG (%)	ProT (%)	RT (kg kg ⁻¹)
C0	1.46 c	68.8 c	71 a	23.5 b	4.4 b	45.7 b	52.5 a	44.8 ab	5.73 a	268.6 a	11.4 a	10.1 a	1.44 a
C14	2.55 c	74.6 a	44 b	22.4 b	5.0 a	35.1 c	51.2 ab	43.7 b	5.06 b	215.2 b	10.6 ab	9.4 ab	1.42 a
C19	4.43 b	75.5 a	41 b	22.0 b	4.5 b	36.1 c	50.6 bc	46.0 a	5.27 b	241.5 ab	10.0 b	9.1 b	1.45 a
CU	6.79 a	72.1 b	69 a	32.6 a	4.1 b	56.5 a	49.1 c	44.2 ab	4.63 c	255.2 ab	10.6 ab	9.8 ab	1.34 b
DSH	1.76	1.4	8.4	3.1	0.4	6.8	1.6	2.1	0.30	49.4	1.1	0.8	0.06

Medias con distinta letra en las columnas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). G: genotipos C0, C14 y C19: ciclo 0, 14, y 19, respectivamente de selección masal visual recurrente, CU: compuesto universal con 12 ciclos de selección masal recurrente, DSH: diferencia significativa honesta, REN: rendimiento de grano, PH: peso hectolítrico, IF: índice de flotación, PCG: peso de cien granos, PMS: pérdida de materia seca, PR: pericarpio retenido, HN: humedad de nixtamal, HT: humedad de tortilla, EL24: elongación de tortilla a 24 horas, FR24: fuerza de ruptura de tortilla a 24 horas, ProG: proteína de grano, ProT: proteína en tortilla, RT: rendimiento de tortilla.

Características de calidad

Con excepción del contenido de proteína en las tortillas (ProT), el análisis de varianza entre ambientes mostró diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) para el resto de los parámetros de calidad. Entre genotipos, 10 variables mostraron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$), las tres restantes fueron significativas ($P \leq 0.05$). La interacción IG \times A resultó significativa sólo para pérdida de materia seca, elongación y rendimiento de tortillas (Cuadro 1). Los resultados confirman la existencia de diferencias entre las medias para todas las características de calidad (Vázquez *et al.*, 2010; 2012b), y tales diferencias fueron causadas por el efecto de la SMV entre los genotipos de la raza Tuxpeño o por las diferencias intrínsecas entre los tres genotipos y la influencia ambiental a través de los ciclos de selección, con respecto al material CU utilizado como testigo (López-Morales *et al.*, 2020).

Características físicas del grano

Las variables peso hectolítrico (PH), índice de flotación (IF) y peso de cien granos (PCG) mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre genotipos (Cuadro 2). En PH el C19 y C14 tuvieron los valores más elevados, con 75.5 y 74.6 kg hL⁻¹, respectivamente, seguidos del CU con 72.1 kg hL⁻¹, y por último el C0 con 68.8 kg hL⁻¹. Para el IF los genotipos C0 y CU registraron los mayores promedios, 71 y 69, respectivamente, los cuales corresponden a granos suaves con un tiempo de cocción de 30 min (IF: 63-87). El C14 y C19 registraron valores de IF de 44 y 41, respectivamente, que corresponden a granos con dureza intermedia (IF: 38-62) con un tiempo de cocción de 35 min. El PCG no mostró diferencias significativas entre medias de los tres genotipos Tuxpeños, cuyos granos fueron de peso bajo (22.0-23.5 g) y diferente de la media del CU, que registró el valor más alto (32.6 g) y calificó como grano de tamaño intermedio (Salinas-Moreno y Aguilar-Modesto, 2010) (Cuadro 2).

Los resultados anteriores fueron semejantes a lo encontrado por Salinas *et al.* (2013) en zonas tropicales de Oaxaca, para las variables PH e IF en los ciclos 14 y 19, lo que parece tomar relevancia en el origen veracruzano del material Tuxpeño con clima de trópico húmedo. El reducido peso de los granos del maíz Tuxpeño (C0, C14 y C19) correlacionó con el rendimiento ($r = -0.64^{**}$), tal como lo informaron Martínez *et al.* (1990) y Pérez *et al.* (2002) quienes obtuvieron valores ligeramente menores a los encontrados en este estudio conforme avanzaba la SMV, y semejantes a los resultados de Pérez *et al.* (2000) y Pérez-Colmenárez *et al.* (2007) con respecto al CU con 12 ciclos de selección. Así mismo, las variables PH, IF y

PCG y la textura suave del grano del maíz Tuxpeño C0, concuerdan con lo informado por Vázquez *et al.* (2010), quienes encontraron en las razas Tuxpeño y Chalqueño, en altitudes similares a Valles Altos centrales de México (> 2200 msnm) resultados semejantes a los de la presente investigación con el ciclo C0 y CU, respectivamente. Se observó una correlación significativa entre PH e IF ($r = -0.87^{**}$), resultado que coincide con el de López-Morales *et al.* (2017), lo que indica que los genotipos con mayor PH fueron los de menor IF (C19) y por tanto los de endospermo más duro. En el extremo opuesto estuvo el CU, que no obstante la menor densidad de sus granos (< PH), fue el de mayor rendimiento y mayor PCG (Cuadro 2).

Características de nixtamalización y calidad de tortillas

El efecto de genotipo en la nixtamalización mostró diferencias significativas en las variables PMS, PR, HN y HT (Cuadro 2), causadas por la SMV; no obstante, los cuatro genotipos registraron valores dentro de lo establecido en la Norma NMX034/1-2002-SCFI-2002 para maíces destinados al proceso de nixtamalización (SE, 2002). Las pérdidas de pericarpio fueron menores al 30 % aceptado como mínimo por la industria de la masa y la tortilla (Salinas *et al.*, 2010). El C19 registró 35 % de PR, lo que facilitó la hidratación del grano, y con ello humedades altas en el nixtamal y las tortillas; consecuentemente, el C19 registró el mayor rendimiento de tortillas (Cuadro 2). Este comportamiento estuvo relacionado con el genotipo, con el reducido tamaño de los granos y con la dureza del endospermo, que fue intermedia. Las correlaciones significativas entre estas variables indican que los maíces más duros (< IF) fueron los que registraron las mayores PMS ($r = -0.69^{**}$); los maíces que retuvieron más pericarpio en su nixtamal (PR) fueron los de mayor tamaño; esto es, mayor PCG ($r = 0.58^{**}$) y los de menos PMS ($r = -0.41^{*}$); resultados semejantes fueron observados por Vázquez-Carrillo *et al.* (2018) para maíces con alto contenido de aceite.

El genotipo CU, que tuvo PMS estadísticamente igual al del C19, retuvo un mayor porcentaje de pericarpio (PR), con lo que la humedad del nixtamal y las tortillas se vio limitada; paralelamente, también el rendimiento de tortillas fue el menor (Cuadro 2). Lo anterior puede estar relacionado con el corto tiempo de nixtamalización (30 min), con el mayor tamaño del grano y con el tipo de almidones de su endospermo suave, lo que permite una mayor disponibilidad de espacios libres dentro de la estructura granular (Agama-Acevedo *et al.*, 2013), lo que facilita la pérdida de agua durante la cocción de la masa, reduce el rendimiento e imparte mayor rigidez a las tortillas. Adicionalmente, se ha informado que una mayor retención del pericarpio contribuye al desarrollo de masas

y tortillas más elásticas y suaves (Martínez-Bustos *et al.*, 2001), aspecto que no se cumplió en las tortillas del CU.

El concepto de elongación hace referencia a un estiramiento o una dilatación, acción y efecto de hacer algo más largo; así, un valor alto de elongación indica que la tortilla se estira más, y a la inversa, valores menores de esta variable indican menor estiramiento y mayor rigidez. Las tortillas con mayor elongación después de ser almacenadas durante 24 h fueron las del C0; a su vez, fueron las que requirieron más fuerza para romperse; ésto es, fueron las más duras (Cuadro 2); resultados semejantes fueron observados por Salinas-Moreno y Aguilar-Modesto (2010) en genotipos de endospermo suave. La elongación de los genotipos de la raza Tuxpeño C14 y C19 a las 24 horas (EL24) fue estadísticamente igual entre ellos y menor a la de C0, lo que puede reflejar un efecto de la SMV (Cuadro 2); sin embargo, al comparar los resultados de los tres genotipos de Tuxpeño, se observó una relación entre la EL24 y la fuerza de rompimiento a las 24 horas (FR24); así, C0 fue el de mayor EL24 y FR24, en tanto que C14 registro numéricamente la menor EL24 y FR24, pues en la FR24 fue estadísticamente igual al C19 y al CU, lo que muestra que la textura de las tortillas almacenadas de la raza Chalqueño (CU), localmente adaptada a los Valles Altos y con 12 ciclos de SM, fue semejante a la del C19.

La FR24 del genotipo C19 (241.5 g_f) fue semejante a la informada para tortillas de buena calidad (240 g_f) con 24 horas de almacenamiento (Vázquez-Carrillo *et al.*, 2018). Adicionalmente, el análisis de correlaciones mostró relaciones significativas entre HN y EL24 ($r = 0.49^{**}$) y con FR24 ($r = -0.35^{*}$), lo que indica que los maíces que alcanzaron mayor humedad en su nixtamal tuvieron mayor elongación en sus tortillas y requirieron menor fuerza para su rompimiento. Por lo antes expuesto, el genotipo C19 podría ser procesado por los industriales de la masa y la tortilla, ya que presentó una buena calidad en sus características de nixtamalización y de tortilla, tanto recién elaboradas como almacenadas (López-Morales *et al.*, 2019).

El mayor contenido de proteína en grano (ProG) y tortillas (ProT) se observó en el genotipo C0 (de endospermo más suave) y el menor contenido de proteína en el C19 (de endospermo intermedio) (Cuadro 2). Al respecto, se ha informado que en maíces mejorados la fertilización nitrogenada aumenta el rendimiento, pero reduce el contenido de proteína (Labuschagne *et al.*, 2018; Com. Pers.)².

²Labuschagne M., R. C. Lindeque and A. van Biljon (2018) Relationships between grain yield and protein quantity and quality in commercial wheat. Book of Abstracts 4th ICC Latin American Cereals Conference. CIMMYT. Mexico City.

En ambas variables (ProG y ProT) los genotipos de Tuxpeño mostraron que conforme se avanzaba en la SMV se perdía proteína en grano, y por ende en la tortilla. Por otra parte, Broa *et al.* (2019) reportaron en maíces nativos pigmentados contenidos de proteína de 7.6 a 11.5 %, destacando que los de menor proteína fueron los de endospermo suave, comportamiento que resulta diferente al de esta investigación, ya que el C0 fue el grano más suave y el de mayor proteína (Cuadro 2), lo cual puede atribuirse a la selección y mejoramiento realizado en los genotipos del maíz Tuxpeño (C0, C14 y C19). El contenido de proteína de los genotipos C0 y CU coincide con lo establecido para las razas Tuxpeño y Chalqueño (Vázquez *et al.*, 2010), lo cual se atribuye a sus orígenes (Trópico húmedo y Valles Altos) y evaluados en alturas semejantes (1900-2905 msnm). La correlación significativa entre el IF y la ProT ($r = 0.38^{*}$) muestra que los genotipos de endospermo más suave ($> IF$) fueron los de más proteína en sus tortillas; de igual manera, los genotipos con más proteína en sus granos (ProG) registraron los menores niveles de humedad en sus tortillas (HT) ($r = -0.48^{**}$), resultado que se explica porque en los maíces de endospermo intermedio (C14 y C19) los gránulos de almidón se encuentran inmersos en una red de proteína muy compacta, lo que dificulta la hidratación del mismo (Agama-Acevedo *et al.*, 2013).

Finalmente, el rendimiento de tortilla (RT) fue significativo en las tres fuentes de variación (G, A e IG \times A) (Cuadro 1). En la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) los tres genotipos de la raza Tuxpeño no tuvieron diferencia significativa entre ellos (Cuadro 2); no obstante, sí existió diferencia entre C19, con un RT de 1.45 kg kg⁻¹, y el CU de menor rendimiento con 1.34 kg kg⁻¹. Los resultados en los materiales de la raza Tuxpeño fueron similares a los de Sierra-Macías *et al.* (2010) para el híbrido experimental HQ-3 de alta calidad proteínica (1.43 kg kg⁻¹) evaluado en el Estado de Veracruz, lo que indica que es un material adaptado, y por lo tanto tiene el mismo efecto, mientras que el C19 concuerda con los resultados del híbrido H-147C de cruza trilineal en la investigación de Vázquez *et al.* (2012b); ésto pudo suceder porque ambos materiales fueron evaluados en Coatlinchán y lugares aledaños, y por tener una selección previa.

De acuerdo con la dureza de grano, el genotipo C19 (intermedio) registró un rendimiento de tortilla acorde con la dureza de su granos (intermedio) (Salinas-Moreno y Aguilar-Modesto, 2010). Otra de las ventajas del C19 fue el menor tamaño de sus granos ($< PCG$), lo que se asoció con un mayor RT ($r = -0.46^{**}$). El RT también correlacionó significativamente con la HN ($r = 0.62^{**}$), HT ($r = 0.48^{**}$) y EL24 ($r = 0.40^{*}$).

CONCLUSIONES

El maíz Tuxpeño V-520C incrementó su rendimiento y calidad del grano y tortilla conforme avanzó la selección masal visual (SMV) para adaptación a Valles Altos de México (> 2200 msnm). Los ciclos de SMV incrementaron el peso hectolítrico, redujeron el tamaño del grano (PCG) y el índice de flotación, así como la proteína de grano y tortilla. El maíz Tuxpeño V-520C con 19 ciclos (C19) de SMV aumentó el rendimiento de grano hasta en un 67.0 % con respecto al ciclo cero (C0), mientras que el Compuesto Universal de la raza Chalqueño (CU) superó al C19 en 34.7 %, con granos de mayor tamaño. El C19 adaptando a las condiciones de Valles Altos, mantuvo una buena calidad en el proceso de nixtamalización y en la calidad de tortilla, por lo que es un maíz adecuado para la elaboración de tortillas. La producción del C19 en los Valles Altos de México puede mejorar los rendimientos de los agricultores y ser procesado con ventajas significativas por los industriales de la masa fresca-tortillas.

BIBLIOGRAFÍA

- AACC, American Association of Cereal Chemists (2010) Approved Methods of Analysis. 11th edition. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, Minnesota, USA. 1269 p.
- Agama-Acevedo E., E. Juárez-García, S. Evangelista-Lozano, O. L. Rosales-Reynoso, L. A. Bello-Pérez (2013) Características del almidón de maíz y relación con las enzimas de su biosíntesis. *Agrociencia* 47:1-12.
- Antuna G. O., S. A. Rodríguez H., G. Arámbula V., A. Palomo G., E. Gutiérrez A., A. Espinoza B., ... y E. Andrio E. (2008) Calidad nixtamalera y tortillera en maíces criollos de México. *Revista Fitotecnica Mexicana* 31(Esp 3):23-27.
- Broa R. E., M. G. Vázquez C., N. G. Estrella C., J. H. Hernández S., B. Ramírez V. y G. Bahena D. (2019) Características fisicoquímicas y calidad de la proteína de maíces nativos pigmentados de Morelos en dos años de cultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10:683-697, <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.481>
- García E. (1973) Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. 2a edición. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 246 p.
- Goodman M. M. (2002) New sources of germplasm: lines, transgenes and breeders. In: El Fitomejoramiento ante los Avances Científicos y Tecnológicos. J. M. Martínez R., F. Rincón S. y G. Martínez Z. (eds). XIX Congreso Nacional de Fitogenética. 2 de septiembre de 2001. Sociedad Mexicana de Fitogenética, A. C.-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila. pp:28-41.
- Iuga M., V. D. Ávila A., T. M. González M. and S. Mironeasa (2019) Consumer preferences and sensory profile related to the physico-chemical properties and texture of different maize tortillas types. *Foods* 8:533, <https://doi.org/10.3390/foods8110533>
- Jiménez-Juárez J. A., G. Arámbula-Villa, E. de la Cruz-Lázaro y M. A. Aparicio-Trápala (2012) Característica del grano, masa y tortilla producida con diferentes genotipos de maíz del trópico mexicano. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo* 28:145-152, <https://doi.org/10.19136/era.a28n2.22>
- López-Morales F., M. G. Vázquez-Carrillo, J. D. Molina-Galán, J. J. García-Zavala, T. Corona-Torres, S. Cruz-Izquierdo, ... y G. Esquivel-Esquivel (2017) Interacción genotipo-ambiente, estabilidad del rendimiento y calidad de grano en maíz Tuxpeño. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8:1035-1050, <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.106>
- López-Morales F., M. G. Vázquez-Carrillo, J. J. García-Zavala, G. López-Romero, D. Reyes-López y J. D. Molina-Galán (2019) Estabilidad y adaptación del rendimiento y calidad de tortilla en maíz Tuxpeño, Valles-Altos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10:1809-1821, <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i8.1851>
- López-Morales F., J. J. García-Zavala, T. Corona-Torres, S. Cruz-Izquierdo, G. López-Romero, D. Reyes-López, ... y J. D. Molina-Galán (2020) Comparación del rendimiento y cambios morfológicos en maíz Tuxpeño V-520C adaptado a valles altos en México. *Revista Fitotecnica Mexicana* 43:133-141, <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.2.133>
- Martínez G. A. (1988) Diseños Experimentales. Métodos y Elementos de Teoría. Trillas. México, D. F. 756 p.
- Martínez-Bustos F., H. E. Martínez-Flores, E. Sanmartín-Martínez, F. Sánchez-Sinencio, Y. K. Chang, D. Barrera-Arellano and E. Rios (2001) Effect of the components of maize on the quality of masa and tortillas during the traditional nixtamalisation process. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 81:1455-1462, <https://doi.org/10.1002/jsfa.963>
- Martínez J. A., J. D. Molina G. y F. Castillo G. (1990) Selección masal para la adaptación en Chapingo de una población de maíz Tuxpeño. *Agrociencia Serie Fitociencia* 4:64-84.
- Molina G., J. D. (1983) Selección masal visual estratificada en maíz. Publicación Especial. Centro de Genética, Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México. 36 p.
- Pérez C. A., J. D. Molina G. y A. Martínez G. (2002) Adaptación a clima templado de razas tropicales y subtropicales de maíz de México por selección masal visual. Rendimiento, altura de planta y precocidad. *Revista Fitotecnica Mexicana* 25:435-441.
- Pérez-Colmenárez A. A., J. D. Molina-Galán y A. Martínez-Garza (2000) Adaptación a clima templado de una variedad de maíz tropical mediante selección masal visual estratificada. *Agrociencia* 34:533-542.
- Pérez-Colmenárez A., J. Molina-Galán, A. Martínez-Garza, P. García-M. y D. Reyes-López (2007) Selección masal para la adaptación a clima templado de razas tropicales y sub-tropicales de maíz de México. *Bioagro* 19:133-141.
- Salinas M. Y. y G. Vázquez C. (2006) Metodologías de análisis de la calidad nixtamalero-tortillera en maíz. Folleto Técnico Núm. 23. Campo Experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chapingo, Estado de México. 91 p.
- Salinas M. Y., M. G. Vázquez C., G. A. Velázquez C. y J. Soria R. (2012) Esquema de selección de maíces con calidad para elaborar masa-tortilla y harinas nixtamalizadas: caso Estado de México. Folleto Técnico Núm. 50. Campo Experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Coatlinchán, Texcoco, Estado de México. 65 p.
- Salinas M. Y., F. Aragón C., C. Ybarra M., J. Aguilar V., B. Altunlar L. y E. Sosa M. (2013) Caracterización física y composición química de razas de maíz de grano azul/morado de las regiones tropicales y subtropicales de Oaxaca. *Revista Fitotecnica Mexicana* 36:23-31, <https://doi.org/10.35196/rfm.2013.1.23>
- Salinas-Moreno Y. y L. Aguilar-Modesto (2010) Efecto de la dureza del grano de maíz (*Zea mays* L.) sobre el rendimiento y calidad de la tortilla. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 2:5-11, <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2010.08.009>
- Santiago-López N., J. J. García-Zavala, A. Espinoza-Banda, U. Santiago-López, G. Esquivel-Esquivel y J. D. Molina-Galán (2020) Adaptación de maíz Tuxpeño a valles altos de México mediante selección masal. *Revista Fitotecnica Mexicana* 43:259-265, <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.3.259>
- SAS Institute (2002) User's Guide of SAS (Statistical Analysis System). SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 550 p.
- SE, Secretaría de Economía (2002) Norma mexicana para maíces destinados al proceso de nixtamalización, NMX-FF-034/1-2002-SCFI-2002. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano cereales maíz blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado-especificaciones y métodos de prueba. Especificaciones y métodos de prueba. Dirección General de Normas, Secretaría de Economía. México, D. F. 18 p.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2020) Anuario estadístico de la producción agrícola. Servicio de Información

- Agroalimentaria y Pesquera, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Diciembre, 2020).
- Sierra-Macías M., A. Palafox-Caballero, G. Vázquez-Carrillo, F. Rodríguez-Montalvo y A. Espinosa-Calderón (2010) Caracterización agronómica, calidad industrial y nutricional de maíz para el trópico mexicano. *Revista Agronomía Mesoamericana* 21:21-29, <https://doi.org/10.15517/am.v21i1.4908>
- Vázquez C. M. G., J. P. Pérez C., J. M. Hernández C., M. L. Marrufo D. y E. Martínez R. (2010) Calidad de grano y de tortillas de maíces criollos del altiplano y valle del Mezquital, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33:49-56, https://doi.org/10.35196/rfm.2010.Especial_4.49
- Vázquez C. M. G., D. Santiago R., Y. Salinas M., I. Rojas M., J. L. Arellano V., G. A. Velázquez C. y A. Espinosa C. (2012a) Interacción genotipo-ambiente del rendimiento y calidad de grano y tortilla de híbridos de maíz en valles altos de Tlaxcala, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:229-237, <https://doi.org/10.35196/rfm.2012.3.229>
- Vázquez C. M. G., H. Mejía A., C. Tut C. y N. Gómez M. (2012b) Características de granos y tortillas de maíces de alta calidad proteínica desarrollados para los Valles Altos Centrales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:23-31, <https://doi.org/10.35196/rfm.2012.1.23>
- Vázquez-Carrillo, M. G., I. Rojas-Martínez, D. Santiago-Ramos, J. L. Arellano-Vázquez, A. Espinosa-Calderón, M. García-Pérez and J. Crossa (2016) Stability analysis of yield and grain quality traits for the nixtamalization process of maize genotypes cultivated in the central high valleys of Mexico. *Crop Science* 56:3090-3099, <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.09.0558>
- Vázquez-Carrillo M. G., R. E. Preciado-Ortiz, D. Santiago-Ramos, N. Palacios-Rojas, A. Terrón I. y A. Hernández-Calette (2018) Estabilidad del rendimiento y calidad de grano y tortilla de nuevos híbridos de maíz con valor agregado para el subtrópico de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41:509-518, <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.4-A.509-518>