

Estabilidad y adaptación del rendimiento y calidad de tortilla en maíz Tuxpeño, Valles-Altos

Fernando López-Morales¹
María Gricelda Vázquez-Carrillo^{2§}
J. Jesús García-Zavala¹
Gustavo López-Romero³
Delfino Reyes-López⁴
José Domingo Molina-Galán^{1†}

¹Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera Méx-Tex km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. Tel. 595 9520200. (fernando.lopez@colpos.mx; zavala@colpos.mx). ²Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México. CP. 56250. Tel. 595 9212742. ³Colegio de Postgraduados-Campus Veracruz. Carretera Federal Xalapa-Veracruz km 88.5, Veracruz. CP. 91700. Tel. 229 2010770. (gustavolr@colpos.mx). ⁴Facultad de Ingeniería Agrohídrica-Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. Universidad s/n, San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla. CP. 73695. Tel. 231 3122933. (Delfino.reyes2001@yahoo.com.mx).

§Autora para correspondencia: gricelda.vazquez@yahoo.com.

Resumen

La variedad V-520C de maíz (*Zea mays* L.) pertenece a la raza Tuxpeño, es originaria de Veracruz (500 msnm) y fue adaptada a los Valles Altos de México (>2 200 msnm) con selección masal visual (SMV) recurrentemente durante 19 ciclos. El objetivo fue evaluar la estabilidad y la adaptación de V-520C original (C0) y los materiales adaptados ciclo 14 (C14) y ciclo 19 (C19) para el rendimiento de grano y calidad de tortilla mediante sitios de regresión (SREG). Entre 2013 y 2014 se evaluaron tres genotipos C0, C14 y C19 en un diseño bloques completos al azar con tres repeticiones. Las evaluaciones se realizaron en el Estado de México y Veracruz con tres experimentos por entidad. El análisis de varianza detectó significancia ($p \leq 0.01$) entre ambientes, genotipos y la interacción genotipo-ambiente y en los dos primeros componentes principales para las seis variables. SREG indica que C19 tuvo mejor adaptación y estabilidad en rendimiento de grano (3.54 t ha⁻¹), humedad de tortilla a las 24 h (42.72%), rendimiento de tortilla fría (1.44 kg kg⁻¹ maíz) y una fuerza reducida para romper la tortilla (193 g_f). La SMV produjo cambios favorables al C19, que tuvo mejor estabilidad y adaptación en Valles Altos de México. Siendo el ambiente Montecillo 2014-PV, el que discriminó entre genotipos y mejor mega-ambiente en las variables. Todos los genotipos y ambientes, con excepción de Tepetates 2014-OI y Coatlinchán 2014-PV, cumplieron con los parámetros requeridos por la norma NMX-034/1 para maíces destinados al proceso de nixtamalización.

Palabras clave: *Zea mays* L., biplot GGE, calidad de nixtamal, selección masal, sitios de regresión.

Recibido: octubre de 2019

Aceptado: diciembre de 2019

Introducción

De acuerdo con las cifras de SIAP (2018) en México se realizó una producción de cerca de 21 millones de toneladas de maíz (*Zea mays* L.) para grano, de ellas anualmente 12 millones se destinan a la producción de tortilla (SE, 2012). Tal producción contó con un rendimiento promedio nacional de 3.9 t ha⁻¹ de grano, de 3.8 y 2.2 t ha⁻¹ para el Estado de México y Veracruz, respectivamente (SIAP, 2018).

El rendimiento y la calidad de tortilla de maíz son aspectos demandados por agricultores e industriales de la masa-tortilla (IMT) y de harina nixtamalizada (IHN), ambas industrias prefieren $\leq 5\%$ de pérdidas de materia seca, IMT un rendimiento de tortilla de 1.4-1.6 kg kg⁻¹ y un pericarpio remanente de $\geq 30\%$, mientras que a la IHN es de $\leq 30\%$, tales aspectos se ven afectados por las condiciones de los ambientes (E), los genotipos (G) y la interacción genotipo-ambiente (GE) (Zepeda *et al.*, 2009; Vázquez *et al.*, 2012).

Molina (1983) sugirió la selección masal visual (SMV) como un método para adaptar maíz a otras regiones, y así aumentar la diversidad genética local ya que; a través, de varios ciclos de selección, las variedades exóticas presentan características similares o superiores a las variedades locales. La SMV se ha usado para adaptar materiales tropicales y subtropicales a climas templados, como los Valles Altos de México (>2 200 m) (Pérez *et al.*, 2000; 2002; 2007).

La raza Tuxpeño, originaria del estado de Veracruz, se distingue por su alto rendimiento, flexibilidad de adaptación, cierta tolerancia a la sequía, resistencia a plagas y enfermedades, buena calidad del grano y de su tortilla (Antuna *et al.*, 2008; Wen *et al.*, 2012; López-Morales *et al.*, 2017). Con el propósito de disponer de germoplasma con estas características, se decidió adaptar la raza Tuxpeño a Valles Altos, ya que conforme avanza en la SMV se cambian las frecuencias de genes favorables para estos atributos (Molina, 1983).

La estabilidad (la baja GE) y la calidad de las tortillas de las razas se han investigado en pocos estudios de México conjuntamente, ya que se cuenta con pocas razas adaptadas a otros sitios de donde son originales y son poco utilizadas por los programas de mejoramiento genético (Castillo, 1993). López-Morales *et al.* (2017) evaluaron la raza Tuxpeño adaptada a Valles Altos, bajo el modelo AMMI (efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas) y observaron que el ciclo de selección más avanzado en SMV tuvo mejores rendimientos y calidad de grano con respecto al C0, resultados semejantes fueron informados por De Jesús *et al.* (1990); Pérez *et al.* (2000) quienes estudiaron los ciclos: C0 y del C2 al C11 y C12 respectivamente, sin el mismo modelo y con variables agronómicas.

El modelo de sitios de regresión (SREG) ha sido útil para estimar la estabilidad y la interacción GE del rendimiento en el cultivo del maíz, así como en sus características de calidad de tortilla (Vázquez-Carrillo *et al.*, 2016), este modelo explica la respuesta de los genotipos en ambientes específicos y es representado en una gráfica biplot GGE, donde se muestran los efectos de los G e interacción GE, eliminando el efecto de localidad (Yan *et al.*, 2000).

La variedad de maíz V-520C de la raza Tuxpeño fue adaptada a Valles Altos con SMV, aumentando su rendimiento y adaptación recurrentemente para los ciclos 14 (C14) y 19 (C19); sin embargo, es necesario conocer su calidad de tortilla para determinar si cumplen con las

características de calidad demandadas por las industrias procesadoras. El objetivo fue determinar la estabilidad y adaptación del rendimiento y características de calidad de nixtamal y de tortilla de la variedad de maíz V-520C (C0), así como, los materiales C14 y C19 evaluados en su ambiente original (Veracruz) y en el ambiente adaptado (Estado de México), analizados mediante el modelo de SREG. Se espera, que el C19 obtenga mayor estabilidad y adaptación para el rendimiento de grano y características de calidad, por tener un mayor número de ciclos adaptados con SMV.

Materiales y métodos

El germoplasma evaluado fue la variedad de maíz V-520C, denominada en este estudio ciclo cero (C0), así como dos genotipos adaptados a Valles Altos mediante la SMV realizada de manera recurrente en la V-520C, denominados ciclo 14 (C14) y ciclo 19 (C19). Inicialmente se ocuparon 510 plantas en cada ciclo, pero conforme se avanzaba en la SMV, se seleccionó de manera visual solo las mejores 50 mazorcas en cada ciclo, incrementando el rendimiento de grano y las características de mazorca (grande, cilíndrica, sana, con hileras rectas y grano blanco dentado) típicas de la raza Tuxpeño (Molina, 1983).

La SMV para adaptación de C14 y C19 se desarrolló en el Campo Experimental del Colegio de Postgraduados (de 1993 a 2012), ubicado en Montecillo, Texcoco, Estado de México a una altitud de 2250 m, donde predomina el clima templado subhúmedo (García, 1973).

Ubicación de los experimentos

Los tres genotipos C0, C14 y C19 se evaluaron dos años en Montecillo (M 2013-PV y M 2014-PV) y uno en Coatlinchán (C 2014-PV), municipio de Texcoco, Estado de México, ambas pertenecientes a los Valles Altos. También se establecieron, durante tres ciclos agrícolas en la localidad de Tepetates (T 2013-PV, T 2014-OI, T 2014-PV), municipio de Manlio Fabio Altamirano, Veracruz. El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con tres repeticiones, donde la unidad experimental consistió en dos surcos de 6 m de longitud, separados a 80 cm; se sembraron dos semillas cada 50 cm, lo que hizo un total de 52 plantas por parcela, con una densidad de población de 50 000 plantas ha⁻¹.

Manejo agronómico

En los dos años de evaluación en Montecillo la fórmula de fertilización fue 140-60-00 (kg ha⁻¹ de N-P-K), mientras que en Coatlinchán se usó 140-40-00, previo a un análisis de suelo para determinar la fórmula de todas las localidades (Cuadro 1), en las localidades de Valles Altos la aplicación de nitrógeno se dividió en dos partes, la primera al momento de la siembra aplicando todo el fósforo y la segunda, 35 días después de siembra. En las tres localidades se aplicó un riego inicial, adicionalmente en Montecillo se dieron tres riegos de auxilio durante el ciclo del cultivo.

La dosis de fertilización en los tres experimentos de Tepetates, Veracruz, fue 110-46-00, la cual se dividió de la siguiente manera: 64-18-00 al momento de la siembra y el resto, 20 días después. Sólo al ensayo de Tepetates otoño-invierno (O-I) se le aplicó riego cada 10 días, ya que los ensayos establecidos en primavera-verano (P-V) de los años 2013 y 2014 fueron de temporal.

Cuadro 1. Características edafoclimáticas de las seis localidades evaluadas del estado de México y Veracruz (2013-2014).

Localidad, año-ciclo [†]	Estado	Altitud (m)	Fecha Siembra/cosecha	Fertilización (kg ha ⁻¹ de N-P)	Tipo de suelo con su pH	Precipitación [‡] (mm)	T (°C)	
							Max [§]	Min ^p
Montecillo, 2013-PV	MÉX	2 250	21-05/21-11	140-60	Vertisol pH 7.5	1277 a	29	6
Montecillo, 2014-PV	MÉX	2 250	05-06/04-12	140-60	Vertisol pH 7.5	1179 a	29	3
Coatlinchán, 2014-PV	MÉX	2 300	09-05/20-11	140-40	Phaeozem pH 6.2	1306 b	30	6
Tepetates, 2013-PV	VER	20	24-05/23-09	110-46	Vertisol pH 6.3	1227	35.9	21.2
Tepetates, 2014-OI	VER	20	28-01/16-05	110-46	Vertisol pH 6.3	26 c	42.2	10.6
Tepetates, 2014-PV	VER	20	27-06/09-10	110-46	Vertisol pH 6.3	1975	34.8	20.2

[†]= año de siembra y ciclo de evaluación; PV= primavera-verano; OI: otoño-invierno; MÉX= Estado de México, VER= estado de Veracruz; [‡]= precipitación total (del periodo siembra/cosecha); [§]= temperatura máxima; ^p= temperatura mínima (durante el periodo siembra/cosecha); ^{a, b, c}= riego inicial con 10 cm de lámina + tres riegos auxiliares con 5 cm de lámina (antes y durante floración), riego inicial, diez riegos auxiliares, respectivamente, todos de tipo rodado.

Variables evaluadas

El rendimiento de grano (REN) se obtuvo en t ha⁻¹ de grano mediante el peso seco del grano con 12% de humedad en cada parcela, extrapolado a la superficie de una hectárea. Los tiempos de cocción del grano se asignaron de acuerdo con la NMX-034/1 (2002): el C19 recibió 40 min (duro), el C14, 35 min (intermedio) y C0, 25 min de cocción (suave). En el licor de cocción (nejayote) se evaluó la pérdida de materia seca (PMS), y en el nixtamal el pericarpio retenido (PR), ambas variables se informan en porcentajes (Salinas y Vázquez, 2006), en tortillas frías se evaluó el rendimiento (RTF) expresado como kg de tortillas por kg de grano de maíz procesado.

La elaboración de tortilla se realizó siguiendo el método tradicional (Vázquez-Carrillo *et al.*, 2016). La fuerza de punción para romper la tortilla (FP) se evaluó en el texturómetro Brookfield[®] modelo CT3 (Middleboro, MA, USA) y se informa en gramos-fuerza (g_f). La FP y la humedad de las tortillas (HT24) se evaluaron en tortillas frías: 2 y 24 h después de su elaboración, respectivamente. Las tortillas frías se empacaron en bolsas de plástico con sellado ziploc[®] y se almacenaron a 4 °C (refrigeración) (Vázquez *et al.*, 2015).

Análisis estadístico

Los datos de rendimiento de grano y variables de calidad de nixtamal y tortilla fueron analizados con el modelo SREG (Yan *et al.*, 2001), mediante el paquete estadístico SAS para Windows, versión 9.0 (SAS, 2002). Con este modelo se obtuvo una gráfica biplot construida con los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) para cada variable.

Resultados y discusión

El análisis de varianza detectó significancia ($p \leq 0.01$) entre ambientes (E), entre genotipos (G) y en la interacción genotipo-ambiente (GE) para todas las seis variables evaluadas que se mencionan en el Cuadro 2. Esto significa que el efecto de la SMV realizó cambios genéticos importantes en las dos poblaciones seleccionadas (C14 y C19) con respecto al C0, y que al menos un genotipo fue diferente; asimismo, los ambientes tuvieron efecto por ser contrastantes, lo que justificó las diferencias entre las medias de las variables y ambientes, donde ambos efectos también se vieron reflejados en la significancia de la interacción GE, lo cual coinciden con los datos de Vázquez-Carrillo *et al.* (2016); López-Morales *et al.* (2017).

Cuadro 2. Cuadrados medios en rendimiento de grano y calidad de nixtamal y tortillas de los genotipos investigados en seis ambientes del estado de México y Veracruz (2013-2014).

Fuente de variación	Grados de libertad	REN	Nixtamal		Tortilla		
			PMS	PR	HT24	RTF	FP
E	5	11.56**	3.68**	2650.72**	30.79**	0.033**	13014.02**
G	2	17.15**	0.98**	933.88**	37.93**	0.017**	915.9**
GE	10	2.54**	0.3**	83.54**	18.83**	0.004**	807.57**
CP1	6	8.63**	0.44**	418.43**	43.42**	0.011**	1016.69**
CP2	4	1.99*	0.58**	48.15**	0.91	0.002*	951.86**
Error	34	0.75	0.05	3.34	0.91	0.001	48.94
CV (%)	-	34.88	5.09	4.29	2.32	2.293	3.47
R ²	-	0.82	0.92	0.99	0.93	0.875	0.97
\bar{X}	-	2.48	4.75	42.54	41.15	1.406	201.25

*= $p \leq 0.05$; **= $p \leq 0.01$; E= ambiente; G= genotipos; GE= interacción genotipo-ambiente; CP= componente principal; CV= porcentaje de coeficiente de variación; R²= coeficiente de determinación; \bar{X} = promedio de la variable; REN= rendimiento de grano; PMS= pérdida de materia seca; PR= pericarpio retenido; HT24= humedad de tortilla a las 24 h; RTF= rendimiento de tortilla fría; FP= fuerza de punción.

Adaptación y estabilidad del rendimiento de grano

La significancia estadística de la interacción GE para el REN indica que al menos un genotipo evaluado tuvo mejor adaptación a un ambiente específico, de igual manera, fueron significativos los dos componentes principales (CP1 y CP2) (Cuadro 2), que explicaron 86.64% y el 13.36% de la variabilidad, respectivamente (Figura 1A). Esto ocurrió por un número pequeño tanto de genotipos como de ambientes. Los ambientes hacia la derecha en la Figura 1A muestra que el genotipo C19 fue de mayor rendimiento. La longitud del vector de los ambientes indica la variabilidad en el rendimiento explicada por los ambientes y viceversa (Crossa *et al.*, 2015).

En esta investigación los componentes CP1 y CP2 explicaron 100% de la variabilidad en las seis variables estudiadas (Figura 1A-1F), lo cual se atribuye a una baja interacción GE y una alta correlación fenotípica entre los sitios, debido al número de genotipos y de ambientes incluidos; resultados semejantes fueron observados por Ibáñez *et al.* (2006) al evaluar 13 híbridos de maíz en tres localidades, lo cual indica que este estudio se concentró en la adaptación y estabilidad de los tres genotipos de la raza Tuxpeño con distintos ciclos de SMV, evaluados en seis ambientes.

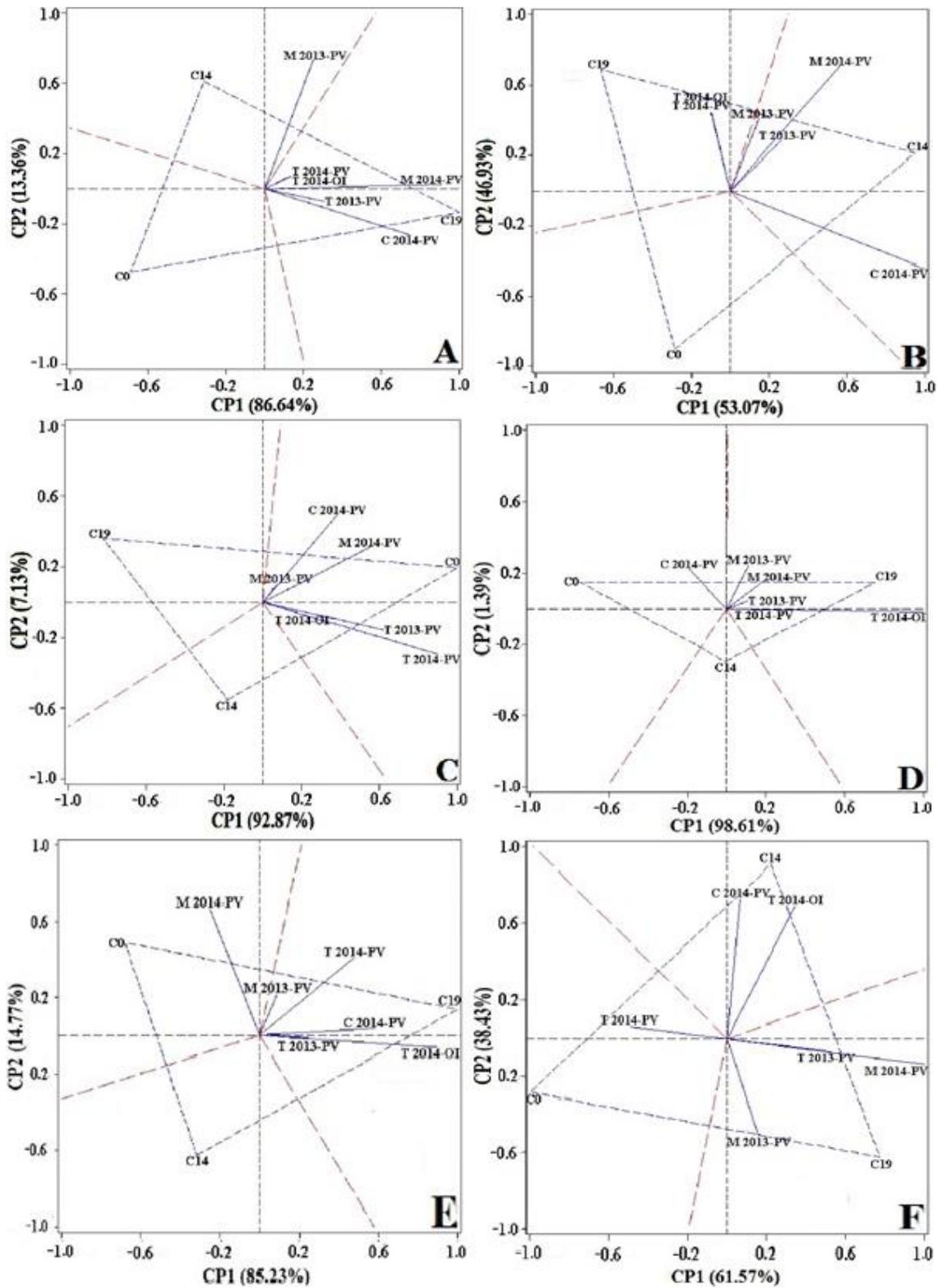


Figura 1. Biplot de los dos componentes principales del rendimiento de grano. A) pérdida de materia seca; B) pericarpio retenido; C) humedad de tortilla a las 24 h; D) rendimiento de tortilla fría; E) fuerza de punción de la tortilla; y F) del modelo SREG de los tres genotipos.

Así, el genotipo C19 fue de mayor rendimiento (3.54 t ha^{-1}), adaptación y estabilidad en los ambientes de estudio; en tanto que C0 y C14 tuvieron un rendimiento promedio de 1.62 y 2.29 t ha^{-1} respectivamente, resultando menor a la media nacional de 3.9 t ha^{-1} , según SIAP (2018) y donde su ubicación en los cuadrantes izquierdos y lejanía del CP2= 0, muestran su inestabilidad (Figura 1A).

Por otra parte, los ambientes se ubicaron en el mega-ambiente (región donde una especie de cultivo está en un ambiente bastante homogéneo) del genotipo que obtuvo el más alto promedio del rendimiento dentro de cada ambiente. Esto significa que el mega-ambiente del genotipo C19 (Figura 1A) tuvo los mayores rendimientos en todos los ambientes evaluados excepto en M 2013-PV, lo que pudo deberse al avance de los ciclos de SMV con los que cuenta este genotipo, favorecido por las frecuencias genéticas para rendimiento, tal como los que encontraron De Jesús *et al.* (1990); Pérez *et al.* (2000) para la raza Tuxpeño en la misma variable del genotipo V-520C, excepto en M 2013-PV ubicado en el mega-ambiente de C14, lo que indica que para este ambiente tal genotipo tuvo el mayor promedio de rendimiento de grano. La semejanza en el rendimiento de los ambientes M 2013-PV y M 2014-PV (Cuadro 3) se debe a la diferencia entre genotipos, tal como lo muestra la Figura 1A al colocarlos en diferentes mega-ambientes. El menor rendimiento del genotipo C0 se atribuye a su inadaptación a Valles Altos (Márquez-Sánchez, 2008).

El arreglo entre los vectores de ambientes, con ángulos menores a 90° (Yan *et al.*, 2000) permite la organización de los genotipos de manera muy similar, tal como sucedió en el mega-ambiente del genotipo C19 (Figura 1A).

Cuadro 3. Medias del rendimiento de grano y calidad de nixtamal y tortilla de los genotipos investigados en seis ambientes del estado de México y Veracruz (2013-2014).

Fuente	Rendimiento de grano (t ha^{-1})	Pérdidas materia seca (%)	Pericarpio retenido (%)	HT24 (%)	Rendimiento de tortilla (kg kg^{-1})	Fuerza de punción (gf)
C0	1.62 b	4.51 c	50.54 a	39.86 c	1.39 b	193.05 b
C14	2.29 b	4.98 a	40.53 b	40.88 b	1.38 b	206 a
C19	3.54 a	4.76 b	36.57 c	42.72 a	1.44 a	204.72 a
DMS	0.7	0.19	1.49	0.78	0.02	5.71
M 2013-PV	3.56 a	4.5 cd	28.21 d	43.12 a	1.47 a	163.33 d
M 2014-PV	3.56 a	4.22 de	51.2	43.22 a	1.48 a	162.66 d
C 2014-PV	1.33 b	5.25 b	37.6 c	39.43 c	1.39 b	196.77 c
T 2013-PV	2.91 a	4.71 c	35.5 c	41.33 b	1.33 c	215.22 b
T 2014-OI	2.65 a	5.74 a	29.46 d	38.71 c	1.37 bc	204.44 c
T 2014-PV	0.88 b	4.07 e	73.32 a	41.1b	1.37 bc	265.11 a
DMS	1.23	0.34	2.6	1.36	0.04	9.95
IMT	-	≤ 5	≥ 30	-	1.4-1.6	-
IHN	-	≤ 5	≤ 30	-	-	-

HT24= humedad de tortilla a las 24 h; DMS= diferencias mínimas significativas; valores establecidos por la IMT (industria de la masa y tortilla) y por la IHN (industria de harina nixtamalizada). Medias con distintas letras son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

En tanto, los ambientes que forman un ángulo cercano a 90° no guardan relación en la forma de ordenar a todos los genotipos, como sucedió entre los ambientes M 2013-PV y C 2014-PV. Los ambientes con la mayor longitud de vectores fueron los de Valles Altos (M 2013-PV, C 2014-PV y M 2014-PV) y a su vez los que mejor discriminaron los genotipos (Yan *et al.*, 2000), debido al proceso de adaptación de los ciclos C14 y C19. En tanto los ambientes de Tepetates, Ver. (T 2013-PV, T 2014-OI y T 2014-PV) no discriminaron entre genotipos (reducida longitud del vector), debido a que no fue el ambiente de selección, ya que estos ambientes registraron temperaturas mayores (34.8-42.2 °C) y precipitaciones más abundantes (1975 mm) mal distribuida, tal como precisó López-Morales *et al.* (2017) en los mismos ambientes evaluados, así como menor dosis de fertilización, comparados con los ambientes de Valles Altos, de acuerdo con los análisis de suelos (Cuadro 1).

Los resultados indican que la SMV es un método eficiente para aumentar el rendimiento y la adaptación de la variedad de maíz V-520C Tuxpeño, pues el C19 tuvo el mejor rendimiento en cinco de los seis ambientes. Los resultados concuerdan con los de Pérez *et al.* (2002; 2007), quienes utilizaron la misma variedad de la raza Tuxpeño en Valles Altos y encontraron que los ciclos más avanzados en SMV tuvieron mayores rendimientos que los ciclos inferiores.

Adaptación y estabilidad de características de nixtamal y tortilla

Las variables de calidad de nixtamal y tortilla presentaron significancia en los primeros dos Componentes Principales (CP), excepto para HT24 en CP2 (Cuadro 2). En todas las variables de calidad los CP1 y CP2 acumularon 100% de la suma de cuadrados, por lo que el análisis del biplot es viable (Crossa *et al.*, 2015), aspecto que se atribuye al reducido número de genotipos evaluados de una misma población, tal como fue observado por Ibáñez *et al.* (2006).

En el proceso de nixtamalización las variables que cambian son: el genotipo y el tiempo de nixtamalización que se asigna de acuerdo con la dureza del grano (NMX-034/1, 2002) y con la finalidad de llevar el grano a un grado de hidratación semejante (Almeida-Domínguez *et al.*, 1997).

El genotipo C0 (4.51%) fue de menor porcentaje de pérdida de materia seca (PMS) (Figura 1B), tiene un coeficiente de interacción negativo y es favorable por menor efecto GE para PMS en el nejayote (Yan *et al.*, 2000). Comparado con el coeficiente de interacción GE positivo de C14 (más estable) y C19 que tuvieron mayor pérdida 4.98 y 4.76%, respectivamente (Cuadro 3).

Los tres genotipos registraron menores valores de PMS a las admitidas como máximo (5%) en la norma NMX-034/1 (2002) para los maíces destinados al proceso de nixtamalización (Cuadro 3). La menor pérdida de materia seca se asocia con un mayor rendimiento de masa y tortillas (Vázquez *et al.*, 2015); en este sentido, se encontró que en el ambiente T 2014-PV, fue el de menor PMS (4.07%), lo que se relacionó con granos de endospermo duro. La PMS de estos genotipos son acordes con lo señalado por Salinas-Moreno y Aguilar-Modesto (2010), quienes indicaron que los maíces de endospermo intermedio tuvieron mayores PMS con respecto a los de endospermo duro.

De acuerdo con los vectores de la Figura 1B, los ambientes que no guardaron ninguna relación en la forma de ordenar los genotipos (cerca de 90°) fueron T 2014-OI, T 2014-PV y C 2014-PV, observándose lo contrario con los demás ambientes (Yan *et al.*, 2000). Valores inferiores de PMS (3%) fueron informados por Vázquez *et al.* (2010) para el maíz nativo Tuxpeño.

Los ambientes C 2014-PV y T 2014-OI superaron el valor requerido de PMS por las industrias procesadoras ($\leq 5\%$), esto pudo suceder por su diferente edafoclimáticas, específicamente por el tipo de suelo Phaeozem y sus diez riegos auxiliares, respectivamente (Cuadro 1). El mega-ambiente del C14 incluyó cuatro ambientes (Figura 1B), siendo el mejor M 2014-PV con 4.22% de PMS, ya que su promedio estuvo en el intervalo requerido por la industria de la masa y tortilla (IMT) y de la harina nixtamalizada (IHN) y fue discriminante entre genotipos. El C19 fue el segundo mejor que cumplió con las demandas de las industrias de masa-tortillas y de harina nixtamalizada, además de tener el mayor rendimiento de grano.

En el pericarpio retenido (PR) el C0 fue el genotipo más estable para esta variable y el de mayor valor (50.54%) en el nixtamal (Cuadro 3), los seis ambientes quedaron incluidos en su mega-ambiente, y cuatro de ellos discriminaron bien entre genotipos (Figura 1C). Todos los vectores de los ambientes fueron menores a 90° entre ellos, lo cual significa que guardan estrecha relación en la forma de ordenar a los genotipos (Yan *et al.*, 2000).

En la Figura 1C del PR se observó una marcada diferencia entre las dos zonas de estudio, de acuerdo con el CP2, el cual dimensiona la interacción GE, los ambientes de Valles Altos quedaron distribuidos en la parte superior extrema derecha y los del estado de Veracruz en la inferior derecha, lo que indica, para las variables PR, los genotipos están mejor adaptados a Valles Altos, donde se ubica la localidad en la que se efectuó la SMV (Crossa, 1990).

La correlación significativa del PR con REN y PMS ($r = -0.44^{**}$ y $r = -0.6^{**}$, respectivamente) muestra que al aumentar el REN disminuyó el PR y los genotipos con mayor PMS retuvieron menos pericarpio (PR) (Cuadro 3), resultados similares fueron encontrados por Zepeda *et al.* (2009); Salinas *et al.* (2010) para maíces mejorados. Los valores de PR de los genotipos C14 y C19 (Cuadro 3) fueron aproximados a los de Vázquez *et al.* (2010) para la raza Tuxpeño (39.1%), esto pudo suceder por que dichos autores realizaron colectas entre altitudes de 1 900 y 2 900 m, alturas semejantes a Valles Altos.

La IMT prefiere los maíces con mayor PR (≥ 30), por contribuir en la reducción de la PMS, aumentar la retención de agua y mejora la textura de la masa y tortilla (Salinas-Moreno y Aguilar-Modesto, 2010); además aporta una mayor cantidad de fibra a la dieta (Almeida-Domínguez *et al.*, 1997). En este sentido todos los genotipos cumplieron con esta industria. Mientras que el genotipo C19 fue el de menor PR (36.57%), por lo que resulta atractivo para la IHN que requiere de $\leq 30\%$, pues una mayor pérdida de pericarpio favorece la producción de harinas de color blanco, los genotipos sembrados en los ambientes T 2014-OI y M 2013-PV, cumplieron los estándares de esta industria (Cuadro 3).

La humedad de tortillas frías después de 24 h de almacenadas (HT24) presentó la mayor diversidad (longitud de vector) entre genotipos en T 2014-OI (Figura 1D); C19 registró el mayor valor (42.72%) y fue semejante a lo informado por Salinas *et al.* (2010) para tortillas 2 h después de su elaboración. Esta variable se ha relacionado con la capacidad de los almidones para retener el agua después de la retrogradación ocurrida durante el enfriamiento de las tortillas (Agama-Acevedo *et al.*, 2004), también se relaciona con la facilidad al enrollado de la tortilla y la menor fuerza que tiene esta para romperse (Almeida-Domínguez *et al.*, 1997).

El genotipo C19 fue el de mayor rendimiento de tortilla fría (RTF) con un promedio de 1.44 kg kg⁻¹, valor que está en el intervalo (1.4-1.6 kg de tortilla por kg⁻¹ de maíz) que aceptan los industriales de la masa-tortillas para los maíces que procesan. El C19 mostró la mayor estabilidad y adaptación, su mega-ambiente de este genotipo incluyó a cinco de los seis ambientes de prueba (Figura 1E). La correlación de RTF con la HT24 ($r= 0.87^{**}$) muestra que el procesamiento de maíces con una alta capacidad para absorber agua durante la nixtamalización asegura un mayor rendimiento de tortillas (Salinas-Moreno y Aguilar-Modesto, 2010).

Por otra parte, la variable HT24 correlacionó con REN ($r= 0.33^*$) y con PMS ($r= -0.3^*$), en tanto el RTF correlacionó con las variables REN, PMS y HT24 ($r= 0.32^*$, -0.3^* y 0.57^{**} , respectivamente); por último, la variable FT también correlacionó con REN, PR y RTF ($r= -0.42^{**}$, 0.5^{**} y -0.59^{**} , respectivamente). El valor con asterisco de la correlación nos indica la significancia, así como, la relación positiva o negativa que existe entre las variables.

La Figura 1D que corresponde a la HT24, evidencia que en el mega-ambiente del genotipo C0 solo estuvo el ambiente C 2014-PV que discriminó entre genotipos, este ambiente fue el único que no guardó relación con los demás vectores de los ambientes ($>90^\circ$) (Yan *et al.*, 2000). En tanto, los otros cinco ambientes pertenecieron al mega-ambiente de C19, donde solo tres ambientes discriminaron entre genotipos, de los cuales solo M 2013-PV y M 2014-PV se localizaron en la parte extrema derecha del biplot, donde se sitúan los promedios más altos en genotipo y ambientes (Cuadro 3 y Figura 1D). Ningún ambiente correspondió al mega-ambiente de C14, siendo T 2014-PV el más estable seguido por el ambiente T 2014-OI.

La variable HT24 está correlacionada con REN (positivo) y con PMS (negativo). Se ha reportado que la humedad de tortilla dos horas después de su elaboración se correlaciona con la HT24; ésta última mostró significancia entre genotipos y entre ambientes (Cuadro 2), ambos resultados fueron semejantes a lo informado por Zepeda *et al.* (2007) y Salinas *et al.* (2010). La HT24 de C19 (Cuadro 3) fue semejante al de la raza Tuxpeño (42%), reportado por Vázquez *et al.* (2010), lo que confirma la afinidad entre el material adaptado (C19) con la versión nativa sembrada en Valles Altos.

La Figura 1E, correspondiente al rendimiento de tortilla fría (RTF), refleja que el genotipo C0 y C14 se ubicaron en los cuadrantes $CP1 < 0$, lo que significa que son menos adaptados, sumándose el ambiente M 2014-PV que discriminó entre genotipos, siendo el de mayor promedio con 1.48 kg kg⁻¹ localizado en el mega-ambiente de C0 (Cuadro 3). En tanto, los cinco ambientes restantes se ubicaron en los cuadrantes $CP1 > 0$, los cuales guardan una estrecha relación entre ellos ($< 90^\circ$), así como al mega-ambiente del C19 (el más estable), donde T 2014-PV y T 2014-OI resultaron discriminantes, mientras que para C14 no correspondió ningún ambiente, lo que indica su mal resultado en todos los ambientes prueba. El RTF correlacionó positivamente con la variable HT24, lo que indica que a mayor humedad el rendimiento de tortillas se elevó.

El efecto de ambiente en Valles Altos evaluado en este trabajo coincide con los resultados de Zepeda *et al.* (2007) y los de Vázquez *et al.* (2015) para los valores de RTF, esto debido a que dichos autores utilizaron los mismos ambientes para evaluar, además de ser el lugar de adaptación de los materiales; así mismo, sus resultados tuvieron promedios mayores que los aquí observados (Cuadro 3). El RTF es una variable muy sensible a los efectos de la fertilización de nitrógeno y a la humedad (riegos) (Cuadro 1), tal como lo señalan Zepeda *et al.* (2007) y Salazar-Martínez *et al.*

(2015). Tanto los promedios del genotipo C19, como de los dos ambientes de Montecillo cumplieron con los valores de RTF demandado por la IMT, por lo que son los más recomendables para esta industria.

Las tortillas más suaves (<fuerza) se produjeron con el genotipo original (C0), en tanto que los ciclos C14 y C19, requirieron más fuerza y esta fue estadísticamente igual en estos dos ciclos de mejoramiento (Cuadro 3), no obstante, las tortillas del C19 requirieron una fuerza de punción (FP) igual a la de tensión (204 gr) informada por Antuna *et al.* (2008) para la raza Tuxpeño, concluyendo que las tortillas del maíz criollo Tuxpeño fueron las de mejor textura. De igual manera, con los maíces producidos en Montecillo (ambos ciclos), se produjeron las tortillas más suaves (Cuadro 3), lo cual indica que en el ambiente de adaptación se mantuvo la buena calidad de las tortillas del criollo original.

La inclusión del C19 en el mega-ambiente que incluye las localidades de Montecillo, muestra su adaptación, además en esta localidad se presentó la mayor discriminación entre genotipos (Figura 1F). En tanto, el mega-ambiente del genotipo C14 incluyó los ambientes C 2014-PV y T 2014-OI, este último discriminó entre genotipos. Los genotipos C19 y C14, así como sus ambientes mostraron tener mayor adaptación ($CP1 > 0$) que C0 y T 2014-PV ($CP1 < 0$). Cada mega-ambiente ordenó a los ambientes de manera semejante ($< 90^\circ$). La significancia de FP en este estudio concuerda con lo reportado por Vázquez-Carrillo *et al.* (2016) en las tres fuentes de variación (Cuadro 2). Además, el genotipo C19, en el ambiente M 2014-PV registró el mayor rendimiento de grano y un elevado porcentaje (43.22%) de HT24 (Cuadro 3), tal como lo señaló el análisis de correlación.

Conclusiones

La selección masal visual (SMV) produjo cambios favorables en la variedad de maíz V-520C de la raza Tuxpeño con 19 ciclos de selección (C19). Este genotipo presentó la mejor estabilidad y adaptación bajo el modelo sitios de regresión (SREG) para los Valles Altos de México y el estado de Veracruz respecto a los ciclos 0 (C0) y 14 (C14), e incrementó el rendimiento de grano hasta 45.7% y de tortilla hasta 0.05 kg kg^{-1} , siendo estas más suaves y húmedas con respecto al C0. SREG reveló que el ambiente de Montecillo 2014-PV fue el que mejor discriminó entre genotipos, superando en 75.2% en rendimiento de grano, 10.4% en humedad de tortillas a las 24 h, 10.1% en rendimiento de tortilla y disminuyendo hasta el 38.6% en fuerza de punción, esto con respecto a los ambientes inferiores de cada variable. Los genotipos y ambientes cumplieron con la norma NMX-034/1 para maíces destinados a nixtamalización.

Literatura citada

- Agama-Acevedo, E.; Astrid, O. M.; Farhat, I. M.; Paredes-López, O.; Ortíz-Cereceres, J. y Bello-Pérez, L. A. 2004. Efecto de la nixtamalización sobre las características moleculares del almidón de variedades pigmentadas de maíz. *Interciencia*. 29(11):643-649.
- Almeida-Dominguez, H. D.; Suhendro, E. L. and Rooney, L. W. 1997. Corn alkaline cooking properties related to grain characteristics and viscosity. *J. Food Sci.* 62(3):516-519.

- Antuna, G. O.; Rodríguez, H. S. A.; Arámbula, V. G.; Palomo, G. A.; Gutiérrez, A. E.; Espinoza, B. A.; Navarro, O. E. F. y Andrio, E. E. 2008. Calidad nixtamalera y tortillera en maíces criollos de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 31(3): 23-27.
- Castillo, G. F. 1993. La variabilidad genética y el mejoramiento de los cultivos. *Ciencia.* 44:69-79.
- Crossa, J. 1990. Statistical analyses of multilocation trials. *Adv. Agron.* 44:55-85.
- Crossa, J.; Vargas, M.; Cossani, C. M.; Alvarado, G.; Burgueño, J.; Mathews, K. L. and Reynolds, M. P. 2015. Evaluation and interpretation of interactions. *Agron. J.* 107(2):736-747.
- De Jesús, M. A.; Molina, G. J. D. y Castillo, G. F. 1990. Selección masal para la adaptación en Chapingo de una población de maíz Tuxpeño. *Agrociencia.* 1(4):64-84.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía 2ª. (Ed). Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). DF. México. 246 p.
- Ibáñez, M. A.; Cavanagh, M. M.; Bonamico, N. C. y Di Renzo, M. A. 2006. Análisis gráfico mediante biplot del comportamiento de híbridos de maíz. *Investigaciones Agropecuarias.* 35(3):83-93.
- López-Morales, F.; Vázquez-Carrillo, M. G.; Molina-Galán, J. D.; García-Zavala, J. J.; Corona-Torres, T.; Cruz-Izquierdo, S.; López-Romero, G.; Reyes-López, D. y Esquivel-Esquivel, G. 2017. Interacción genotipo-ambiente, estabilidad del rendimiento y calidad de grano en maíz Tuxpeño. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 8(5):1035-1050.
- Márquez-Sánchez, F. 2008. De las variedades criollas de maíz (*Zea mays* L.) a los híbridos transgénicos. I: Recolección de germoplasma y variedades mejoradas. *Agric. Soc. Des.* 5(2):151-166.
- Molina, G. J. D. 1983. Selección masal visual estratificada en maíz. Centro de genética, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Chapingo, Estado de México. 36 p.
- NMX-FF034-2002-SCFI-Parte-1, Norma mexicana para maíces destinados al proceso de nixtamalización. 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. Secretaria de Economía (SE). México, DF. 18 p.
- Pérez, C. A. A.; Molina, G. J. D. y Martínez, G. A. 2000. Adaptación a clima templado de una variedad de maíz tropical mediante selección masal visual estratificada. *Agrociencia.* 34(5):533-542.
- Pérez, C. A. A.; Molina, G. J. D. y Martínez, G. A. 2002. Adaptación a clima templado de razas tropicales y subtropicales de maíz de México por selección masal visual. Rendimiento, altura de planta y precocidad. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(4): 435-441.
- Pérez, C. A. A.; Molina, G. J. D.; Martínez, G. A.; García, M. P. y Reyes, L. D. 2007. Selección masal para la adaptación a clima templado de razas tropicales y sub-tropicales de maíz de México. *Bioagro.* 19(3):133-141.
- Salazar-Martínez, J.; Rivera-Figueroa, C. H.; Arévalo-Gallegos, S.; Guevara-Escobar, A.; Maldabarrera, G. y Rascón-Cruz, Q. 2015. Calidad del nixtamal y su relación con el ambiente de cultivo del maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 38(1):67-73.
- Salinas, M. Y. y Vázquez, C. G. 2006. Metodologías de análisis de la calidad nixtamalero-tortillera en maíz. INIFAP. Campo Experimental Valle de México. Chapingo, Estado de México. México. Folleto técnico núm. 23. 91 p.
- Salinas, M. Y.; Gómez, M. N. O.; Cervantes, M. J. E.; Sierra, M. M.; Palafox, C. A.; Betanzos, M. E. y Coutiño, E. B. 2010. Calidad nixtamalera y tortillera en maíces del trópico húmedo y sub-húmedo de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 1(4):509-523.

- Salinas-Moreno, Y. y Aguilar-Modesto, L. 2010. Efecto de la dureza del grano de maíz (*Zea mays* L.) sobre el rendimiento y calidad de la tortilla. Ing. Agríc. Bio. 2(1):5-11.
- SAS. 2002. Statistical Analysis System. The SAS System for Windows 9.0. User's guide. Cary, NC. USA. 584 p.
- SE. 2012. Secretaría de Economía. Análisis de la cadena de valor de la tortilla de maíz: estado actual y factores de competencia Local. SE-Departamento General de Industrias Básicas. <http://www.economia.gob.mx/files/comunidadnegocios/industria-comercio/informacionSectorial/20120411-analisis-cadena-valor-maiz-tortilla.pdf>.
- SIAP. 2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. <http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola-siap-gobmx/AvanceNacionalCultivo.do>
- Vázquez, C. M. G.; Arellano, V. J. L. y Santiago, R. D. 2015. Rendimiento y calidad de grano y tortilla de maíces híbridos de Valles Altos de México crecidos en riego y temporal. Rev. Fitotec. Mex. 38(1):75-83.
- Vázquez, C. M. G.; Pérez, C. J. P.; Hernández, C. J. M.; Marrufo, D. M. L. y Martínez, R. E. 2010. Calidad de grano y de tortillas de maíces criollos del Altiplano y Valle del Mezquital, México. Rev. Fitotec. Mex. 33(4):49-56.
- Vázquez, C. M. G.; Santiago, R. D.; Salinas, M. Y.; Rojas, M. I.; Arellano, V. J. L.; Velázquez, C. G. A. y Espinosa, C. A. 2012. Interacción genotipo-ambiente del rendimiento y calidad de grano y tortilla de híbridos de maíz en Valles Altos de Tlaxcala, México. Rev. Fitotec. Mex. 35(3):229-237.
- Vázquez-Carrillo, M. G.; Rojas-Martínez, I.; Santiago-Ramos, D.; Arellano-Vázquez, J. L.; Espinosa-Calderón, A.; García-Pérez, M. and Crossa, J. 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 Sci. 56(6):3090-3099.
- Wen, W.; Franco, J.; Chávez-Tobar, V. H.; Yan, J. and Taba, S. 2012. Genetic characterization of a core set of a tropical maize race Tuxpeño for further use in maize improvement. PLoS ONE. 7(3):e32626.
- Yan, W.; Cornelius, P. L.; Crossa, J. and Hunt, L. A. 2001. Two types of GGE Biplots for analyzing multi-environment trial data. Crop Sci. 41(3):656-663.
- Yan, W.; Hunt, L. A.; Sheng, Q.; and Szlavnic, Z. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on GGE biplot. Crop Sci. 40(3):597-605.
- Zepeda, B. R.; Carballo, C. A.; Muñoz, O. A.; Mejía, C. J. A.; Figueroa, S. B. y González, C. F. V. 2007. Fertilización nitrogenada y características físicas, estructurales y calidad de nixtamal-tortilla del grano de híbridos de maíz. Agric. Téc. Méx. 33(1):17-24.
- Zepeda-Bautista, R.; Carballo-Carballo, A. y Hernández-Aguilar, C. 2009. Interacción genotipo-ambiente en la estructura y calidad del nixtamal-tortilla del grano en híbridos de maíz. Agrociencia. 43(7):695-706.