

## Interacción genotipo-ambiente, estabilidad del rendimiento y calidad de grano en maíz Tuxpeño\*

### Genotype-environment interaction, stability of yield and grain quality in tuxpeño maize

Fernando López-Morales<sup>1</sup>, Ma. Gricelda Vázquez-Carrillo<sup>2§</sup>, José D. Molina-Galán<sup>1†</sup>, J. Jesús García-Zavala<sup>1</sup>, Tarcisio Corona-Torres<sup>1</sup>, Serafin Cruz-Izquierdo<sup>1</sup>, Gustavo López-Romero<sup>3</sup>, Delfino Reyes-López<sup>4</sup> y Gilberto Esquivel-Esquivel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Genética, Posgrado de Recursos Genéticos y Productividad-Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5. Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. Tel. 01 (595) 9520200. (fernando.lopez@colpos.mx; zavala@colpos.mx; tcoranat@colpos.mx; seracruz@colpos.mx). <sup>2</sup>Campo Experimental Valle de México-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carretera los Reyes-Texcoco km 13.5. Coatlinchán, Texcoco, Edo. de México. CP. 56250. Tel. 01 (595) 9212742. (esquivel.gilberto@inifap.gob.mx). <sup>3</sup>Colegio de Postgraduados-Campus Veracruz. Carretera federal Xalapa-Veracruz km 88.5. Veracruz, Veracruz, México. CP. 91700. Tel. 01 (229) 2010770. (gustavolr@colpos.mx). <sup>4</sup>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería Agrohidráulica. San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla. CP. 73695. Tel. 01 (231) 3122933. <sup>§</sup>Autor para correspondencia: gricelda.vazquez@yahoo.com.

#### Resumen

El maíz (*Zea mays* L.) es componente esencial de la dieta de los mexicanos, con un consumo *per capita* promedio de 120 kg. La raza Tuxpeño ha destacado por su alto rendimiento y su amplia adaptación por lo que una vez adaptada a clima templado es necesario evaluar la calidad de su grano con los parámetros de las industrias procesadoras. En esta investigación se estudió el efecto de la interacción genotipo\*ambiente en el rendimiento y las características físicas del grano de los ciclos 14 y 19 del maíz Tuxpeño adaptados mediante selección masal visual (SMV), a los Valles Altos de México. En 2013 y 2014, se evaluó la población original 'C0' y los ciclos 'C14' y 'C19' de SMV, tanto en su ambiente original, trópico húmedo en el estado de Veracruz, como en su ambiente de selección, templado subhúmedo en el Estado de México. Las características evaluadas fueron: rendimiento de grano (REN), índice de flotación (IF), peso hectolítrico (PH), pedicelo, pericarpio y germen de grano. Los datos fueron analizados con el modelo AMMI (efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas). Los resultados indican que la selección

#### Abstract

Maize (*Zea mays* L.) is an essential component of the Mexican diet, with an average of 120 kg *per capita* consumption. The Tuxpeño breed has stood out for its high yield and its wide adaptation so that once adapted to temperate climate it is necessary to evaluate the quality of its grains with the parameters of the processing industries. In this research the effect of the genotype\*environment interaction on yield and physical characteristics of the grain of 14<sup>th</sup> and 19<sup>th</sup> cycles of Tuxpeño maize adapted by mass visual selection (SMV) in the Valles Altos of Mexico was studied. In the 2013 and 2014 years, the original population 'C0' and the cycles 'C14' and 'C19' of SMV were evaluated, both in its original environment, moist tropics in the State of Veracruz, and in its selection environment, temperate subhumid in the State of Mexico. The evaluated characteristics were: grain yield (REN), flotation index (IF), hectolitic weight (PH), pedicel, pericarp and grain germ. The data were analyzed with the AMMI model (main additive effects and multiplicative interactions). The results indicate that selection for adaptation, crop conditions and the effect of

\* Recibido: marzo de 2017  
Aceptado: junio de 2017

para adaptación, las condiciones del cultivo y el efecto del ambiente durante su desarrollo modificaron favorablemente el REN y algunas de las características de calidad del grano de los genotipos. En Montecillo 2013-PV y 2014-PV se registró el mejor rendimiento ( $3.5 \text{ t ha}^{-1}$ ), sobresaliendo 'C19', por su estabilidad, granos de endospermo duro (<IF) y mayor PH.

**Palabras clave:** *Zea mays* L., adaptación, industria masa-tortilla, modelo AMMI, selección masal visual.

## Introducción

En México, el maíz (*Zea mays* L.) se siembra aproximadamente en ocho millones de hectáreas, es el cultivo con mayor superficie agrícola, con un rendimiento promedio de  $3.4 \text{ t ha}^{-1}$  (SIAP, 2015). El maíz es componente esencial de la dieta de los mexicanos, de acuerdo con SE (2012) aproximadamente la mitad de producción nacional (12 millones de toneladas) es destinado para hacer tortilla, con un consumo *per capita* de 120 kg, equivalente a 328 g diarios (Figuroa *et al.*, 2001), elaboradas ya sea mediante el proceso tradicional (maíz-masa-tortilla), utilizando harina nixtamalizada de maíz, o bien mediante la combinación de ambos.

La raza de maíz Tuxpeño ha destacado por su alto rendimiento, calidad de grano y resistencia a plagas y enfermedades. Esta raza predomina en el estado de Veracruz, en altitudes de 0 a 500 m, donde prevalecen condiciones climáticas del trópico húmedo (Bellon *et al.*, 2005; Wen *et al.*, 2012).

En México, los programas de mejoramiento genético de maíz, en la mayoría de los casos, se han limitado al uso de pocas razas de amplia adaptación: Tuxpeño, en el trópico húmedo, Celaya y Cónico Norteño, en El Bajío; Chalqueño y Cónico, en Valles Altos (Castillo, 1993). Sin embargo, hay evidencias de uso de germoplasma tropical y subtropical adaptado a climas templados mediante selección, específicamente en Valles Altos Centrales (Molina, 1983; Pérez *et al.*, 2000; 2002; 2007), con ganancias en rendimiento y adaptabilidad. La raza Tuxpeño se ha ocupado por su gran base genética, capacidad de cruzamiento y su productividad *per se*, lo cual aumenta la diversidad genética existente en cualquier programas de mejoramiento genético (Wen *et al.*, 2012).

La calidad del grano de maíz se fundamenta en gran parte, en las características físicas para su comercialización (SE, 2002). La industria de harina nixtamalizada (IHN) prefiere

the environment during its development favorably modified the REN and some of the grain quality characteristics of the genotypes. Montecillo 2013-PV and 2014 PV the best yield was recorded ( $3.5 \text{ t ha}^{-1}$ ), outstanding 'C19' due to its stability, hard endosperm grains (<IF) and higher pH.

**Keywords:** *Zea mays* L., adaptation, AMMI model, dough-tortilla industry, visual mass selection.

## Introduction

In México, maize (*Zea mays* L.) is planted in approximately eight million hectares, it is the crop with the highest agricultural cultivation surface, with an average yield of  $3.4 \text{ t ha}^{-1}$  (SIAP, 2015). Maize is an essential component of the Mexican diet, according to the SE (2012) about half of domestic production (12 million tons) is intended for making tortillas, with a *per capita* consumption of 120 kg, equivalent to 328 g daily (Figuroa *et al.*, 2001), elaborated either by the traditional process (maize-dough-tortilla) using nixtamalized maize dough, or by the combination of both.

The Tuxpeño maize breed has stood out for its high yield, grain quality and resistance to pests and diseases. This race predominates in the state of Veracruz, between altitudes from 0 to 500 m, where climatic humid tropical conditions prevail (Bellon *et al.*, 2005; Wen *et al.*, 2012).

In México, maize breeding programs have been limited in most cases to the use of a few widely adapted breeds: Tuxpeño, in the humid tropics, Celaya and Conico Norteño, in the Bajío; Chalqueño and Cónico, in Valles Altos (Castillo, 1993). However, there are evidences of use of tropical and subtropical germplasm adapted to temperate climates by selection, specifically in Valles Altos Centrales (Molina, 1983; Pérez *et al.*, 2000; 2002; 2007), with gains in yield and adaptability. Tuxpeño race has been especially used by its large genetic base, crossing ability and yield *per se*, which increases the genetic diversity in any breeding programs (Wen *et al.*, 2012).

The quality of maize grain is largely based on the physical characteristics for commercialization (SE, 2002). The nixtamalized flour industry (IHN) prefers to process maize with a weight of one hundred grains  $>33 \text{ g}$ , flotation index (IF)  $\leq 20$ , pedicel  $\leq 2\%$ , pericarp between 4.5-5.5% and germ

procesar maíces con un peso de cien granos  $>33$  g, índice de flotación (IF)  $\leq 20$ , pedicelo  $\leq 2\%$ , pericarpio entre 4.5-5.5% y germen  $\leq 12\%$ ; mientras que la industria de la masa y tortilla (IMT) demanda granos con un IF entre 13 y 62% de granos flotantes. Ambas industrias requieren un peso hectolítrico  $\geq 74$  kg hL<sup>-1</sup> (Salinas *et al.*, 2010; Vázquez *et al.*, 2012).

En estudios recientes de calidad de grano y tortilla, el modelo AMMI (efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas) se ha utilizado para el análisis de estabilidad y la interacción genotipo x ambiente (IG\*A) (Vázquez *et al.*, 2012). En maíz, este modelo ha evidenciado su eficiencia para identificar materiales sobresalientes (González *et al.*, 2009; Torres *et al.*, 2011); también es útil para interpretar gráficamente la respuesta de los genotipos, de los ambientes y de la IG\*A; tiene la ventaja de ocupar un número mínimo de repeticiones en los experimentos, lo que permite reducir los costos en los ensayos e incluir un importante número de tratamientos (Zobel *et al.*, 1988; Crossa, 1990). Asimismo, este modelo se ha empleado para evaluar los parámetros de estabilidad y de calidad en granos básicos, como el trigo (*Triticum aestivum* L.) (Hristov *et al.*, 2010) y el arroz (*Oryza sativa* L.) (Fasahat *et al.*, 2014).

En Valles Altos Centrales de México ( $>2$  200 msnm), una variedad representativa de la raza Tuxpeño de origen tropical fue sometida a 14 y 19 ciclos de Selección Masal Visual (SMV) “año con año” para su adaptación, con el propósito de aumentar la diversidad genética. El criterio de selección fue el rendimiento, aspecto de plantas y mazorcas y se consideró conveniente evaluar el rendimiento de los ciclos avanzados de selección 14 y 19, junto con el material original.

No obstante, el mayor rendimiento de las variedades adaptadas, es necesario conocer la calidad del grano para determinar que población cumple con las especificaciones demandadas por las industrias de la masa-tortilla y la de harina nixtamalizada. El objetivo de la investigación fue determinar el efecto de la interacción genotipo\*ambiente en la estabilidad del rendimiento y las características físicas del grano, en una variedad de la raza de maíz Tuxpeño sometida a diferentes ciclos de SMV, evaluada tanto en su clima original (Veracruz), como en el adaptado (Estado de México). Con la finalidad de conocer el potencial de rendimiento y de calidad de grano para las industrias procesadoras de la masa-tortilla y harina nixtamalizada. La hipótesis es que el genotipo con mayor SMV, tendrá el más alto rendimiento y cumplirá las características que requieren las industrias procesadoras.

$\leq 12\%$ ; while the dough and tortilla (IMT) industry demands grains with an IF between 13 and 62% of floating grains. Both industries require a test weight  $\geq 74$  kg hL<sup>-1</sup> (Salinas *et al.*, 2010; Vázquez *et al.*, 2012).

Recent studies of grain and tortilla quality, the AMMI model (additive main effects and multiplicative interactions) has been used for stability and genotype x environment interactions (IG\*A) analysis (Vázquez *et al.*, 2012). In maize, this model has shown its efficiency to identify outstanding materials (González *et al.*, 2009; Torres *et al.*, 2011); it is also useful for graphically interpreting the response of genotypes, environments and IG\*A; it has the advantage of occupying a minimal number of repetitions in the experiments, which reduces costs in testing and allows to include a significant number of treatments (Zobel *et al.*, 1988; Crossa, 1990). This model has also been used to assess the stability parameters and basic grains quality, such as wheat (*Triticum aestivum* L.) (Hristov *et al.*, 2010) and rice (*Oryza sativa* L.) (Fasahat *et al.*, 2014).

In Valles Altos Centrales of México ( $>2$  200 masl), a representative variety of the Tuxpeño breed of tropical origin was subjected to 14 and 19 cycles of visual mass selection (SMV) “year by year” for its adaptation, aiming to increase genetic diversity. The selection criterion was yield and good appearance of plants and cobs, so it was considered convenient to evaluate the yield of advanced selection cycles 14 and 19, together with the original material.

Despite the good yield of the adapted varieties, it is necessary to know the quality of the grain in order to determine which of the three populations meets the specifications demanded by the dough-tortilla and nixtamalized flour industries. The objective of this research was to determine the effect of the genotype\*environment interaction on yield stability and physical characteristics of the grain in a variety of Tuxpeño maize subjected to different SMV cycles, evaluated both in its original climate (Veracruz, México), and in its adapted climate (Estado de México). This in order to know its yield potential and grain quality for the dough-tortilla and nixtamalized flour processing industries. The hypothesis proposed is that the genotype with the highest SMV will have the highest yield and will fulfill the characteristics required by the processing industries.

## Materiales y métodos

### Antecedente del material genético evaluado

El germoplasma utilizado fue una población de maíz de la raza Tuxpeño denominada ‘V-520C<sup>12</sup> (ciclo cero (‘C0’). La adaptación del maíz Tuxpeño ‘C0’ en Valles Altos se realizó “año con año” recurrentemente durante 14 y 19 ciclo (‘C14’ y ‘C19’) respectivamente, por medio de selección masas visual (SMV). Los criterios para seleccionar los materiales ‘C14’ y ‘C19’ para esta investigación fueron: su reducida variación en los primeros ciclos de SMV, el rendimiento de grano, las características de la mazorca (grande, cilíndrica, sana, con hileras rectas y grano blanco dentado) y las de planta (sana, vigorosa, sin acame, típica de Tuxpeño, etc) (Molina, 1983).

Empezando la siembra para la SMV con aproximadamente 510 plantas en cada ciclo y desechando las enfermas, haciendo cruzamientos fraternales posibles entre las plantas más sanas “año con año”. Inicialmente se seleccionaban todas las mazorcas, pero después cuando ya se producía más, se seleccionó de manera visual solo las mejores 50 mazorcas para formar el compuesto de cada ciclo de selección. La adaptación de los materiales sometidos a SMV (‘C14’ y ‘C19’) se llevó a cabo en el Colegio de Postgraduado, ubicado en Montecillo, Texcoco, Estado de México, a una altitud de 2 250 m, donde predomina el clima templado subhúmedo (García, 1973).

### Ubicación de los experimentos

La variedad original ‘V-520C’ de la raza Tuxpeño ‘C0’, así como sus ciclos de SMV ‘C14’ y ‘C19’, fueron evaluados en tres experimentos de Valles Altos Centrales de México, durante 2013 y 2014 se evaluó en Montecillo y solo en el año 2014 en la localidad de Coatlinchán, ambos sitios pertenecientes al municipio de Texcoco, Estado de México. En los mismos años se establecieron otros tres ensayos con los mismos materiales en los ciclos: 2013-PV (primavera-verano), 2014-OI (otoño-invierno) y 2014-PV, en la localidad Tepetates del municipio de Manlio Fabio Altamirano, Estado de Veracruz, correspondiente a la Vertiente del Golfo (Cuadro 1).

### Manejo agronómico

El manejo agronómico y las características generales edafoclimáticas de las seis localidades se describen en el Cuadro 1. El diseño utilizado fue bloques completos al azar con tres repeticiones (Martínez, 1988), donde la unidad

## Materials and methods

### Background of the evaluated genetic material

The germplasm used was a maize population of Tuxpeño race called ‘V-520C<sup>12</sup> (Zero cycle (‘C0). The adaptation of Tuxpeño ‘C’ maize in Valles Altos was carried out “year by year” recurrently during 14 and 19 cycle (‘C14’ and ‘C19’) respectively, by means of visual mass selection (SMV). The criteria for selecting the ‘C14’ and ‘C19’ materials for this research were: its reduced variation in early SMV cycles, grain yield, cob characteristics (large, cylindrical, healthy, with straight rows and serrated white grain) and plant characteristics (healthy, vigorous, without grooming, typical of Tuxpeño, etc) (Molina, 1983).

Starting sowing for the SMV with approximately 510 plants in each cycle and discarding the sickest, making possible fraternal crosses between the healthiest plants “year by year”. Initially all cobs were selected, but then when production was higher, only the best 50 cobs were selected visually to form the compound of each selection cycle. The adaptation of materials subjected to SMV (‘C14’ and ‘C19’) was carried out at the Experimental Field of the Postgraduate College, located in Montecillo, Texcoco, Estado de Mexico, at an altitude of 2 250 m, predominating temperate sub-humid climate (García, 1973).

### Experiments location

The original ‘V-520C’ variety of the Tuxpeño ‘C0’ breed, as well as its ‘C14’ and ‘C19’ SMV cycles, were evaluated in three experiments from Valles Altos Centrales of México during 2013 and 2014 evaluated in Montecillo and only in 2014 in the town of Coatlinchán, both sites belonging to the municipality of Texcoco, Estado de Mexico. In the same years, three other trials were established with the same materials in the cycles: 2013-PV (spring-summer), 2014-OI (autumn-winter) and 2014-PV in Tepetates of Manlio Fabio Altamirano municipality, State of Veracruz, corresponding to the Gulf Slope (Table 1).

### Agronomic management

Agronomic management and the general soil and climatic characteristics of the six localities are described in Table 1. The design used was randomized complete blocks with three replicates (Martínez, 1988), where the experimental

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, dando una densidad de población de 50 mil plantas por hectárea. En Montecillo se utilizó la fórmula de fertilización 140-60 (kg ha<sup>-1</sup> de N-P), mientras que en Coatlinchán fue la 140-40 (Cuadro 1), la aplicación de nitrógeno se dividió en dos partes, la primera al momento de la siembra y la segunda en la última labor de cultivo, aplicando todo el fósforo al momento de la siembra. En ambas localidades se aplicó un riego inicial, pero solo en Montecillo se dieron tres riegos de auxilio durante el ciclo del cultivo. Mientras en Tepetates los ciclos primavera-verano de 2013 y 2014 fueron de temporal y el otoño-invierno de 2014 se le aplicó riegos cada 10 días, desde la siembra hasta el llenado de grano. La dosis de fertilización fue 110-46, la cual se dividió de la siguiente manera: 64-18 al momento de la siembra y el resto en la última labor de cultivo. En los seis ambientes se aplicó herbicida para controlar malezas, con los ingredientes activos dicamba, atrazina y nicosulfuron, las dosis utilizadas fueron las recomendadas en cada producto para el cultivo de maíz en las regiones respectivas.

unit consisted of two rows of 6 m in length, separated at 80 cm. Two seeds were planted every 50 cm, which made a total of 52 plants per plot, giving a population density of 50 thousand plants per hectare. 140-60 fertilizer formula was used (kg ha<sup>-1</sup> of N-P) in Montecillo, while in Coatlinchán it was 140-40 (Table 1), the application of nitrogen was divided into two parts, the first at the time of planting and the second in the last cultivation, applying all the phosphorus at the time of sowing. In both localities an initial irrigation was applied, but only in Montecillo three helping irrigations were given during the crop cycle. While in Tepetates the spring-summer cycles of 2013 and 2014 were rainfed and the autumn-winter of 2014 irrigation was applied every 10 days, from sowing to grain filling. The fertilization dose was 110-46, which was divided as follows: 64-18 at the time of sowing and the rest at the last cultivation. In the six environments herbicide was applied to control weeds, with the active ingredients dicamba, atrazine and nicosulfuron, the doses used were those recommended in each product for maize cultivation in the respective regions.

**Cuadro 1. Características del manejo agronómico y condiciones ambientales de las localidades de evaluación.**  
**Table 1. Characteristics of the agronomic management and environmental conditions of the evaluation sites.**

Localidad, año-ciclo*	Ubicación		Altitud (m)	Fecha Siembra/cosecha	Fertilización (kg ha <sup>-1</sup> de N-P)	Tipo de suelo <sup>†</sup>	Precipitación <sup>‡</sup> (mm)	T(°C)	
	Estado	Mpio						Máx	Mín
Montecillo, 2013-PV	Méx	Tex	2250	21-05/21-11	140-60	Vertisol	1277 <sup>a</sup>	29	6
Montecillo, 2014-PV	Méx	Tex	2250	05-06/04-12	140-60	Vertisol	1179 <sup>a</sup>	29	3
Coatlinchán, 2014-PV	Méx	Tex	2300	09-05/20-11	140-40	Phaeozem	1306 <sup>b</sup>	30	6
Tepetates, 2013-PV	Ver	Man	20	24-05/23-09	110-46	Vertisol	1227	35.9	21.2
Tepetates, 2014-OI	Ver	Man	20	28-01/16-05	110-46	Vertisol	26 <sup>c</sup>	42.2	10.6
Tepetates, 2014-PV	Ver	Man	20	27-06/09-10	110-46	Vertisol	1975	34.8	20.2

\*= año de siembra; OI= otoño-invierno; PV= primavera-verano; Méx= Estado de México; Ver= estado de Veracruz; Tex= Texcoco; Man= Manlio Fabio Altamirano; †= fuente propio; ‡= precipitación total acumulada (del periodo siembra/cosecha) donde a= riego inicial + tres riegos auxiliares, b= riego inicial, c=10 riegos auxiliares; Máx= temperatura máxima y Mín= temperatura mínima (durante el periodo siembra/cosecha).

### VARIABLES EVALUADAS

El rendimiento y las características físicas del grano se evaluaron de acuerdo con lo descrito por Vázquez *et al.* (2012, 2015). El rendimiento (REN) se expresó en t ha<sup>-1</sup> de grano mediante el peso seco de la mazorca con 12% de humedad en cada parcela, extrapolado a la superficie de una hectárea. Las características físicas del grano evaluadas fueron: índice de flotación (IF), que es una medida indirecta de la dureza del grano (Vázquez *et al.*, 2011), así como el

### EVALUATED VARIABLES

The yield and physical characteristics of grain were evaluated as described by Vázquez *et al.* (2012, 2015). The yield (REN) was expressed in t ha<sup>-1</sup> grain by dry weight of the cob with 12% moisture in each plot extrapolated to one hectare area. The physical characteristics of grain tested were: flotation index (FI), which is an indirect measure of grain hardness (Vázquez *et al.*, 2011) and test weight (PH) (55-10-01 method; AACC, 2016). The pedicel percentages

peso hectolítrico (PH) (método 55-10-01; AACC, 2016). Los porcentajes de pedicelo (PIG), pericarpio (PEG) y germen (GEG) del grano, se determinaron siguiendo la metodología descrita por Salinas y Vázquez (2006).

### Análisis estadístico

Los datos de rendimiento y características físicas de grano se analizaron con el modelo AMMI (Zobel *et al.*, 1988, Crossa, 1990), mediante el paquete estadístico SAS versión 9.0 (SAS Institute, 2002). Este modelo generó una gráfica biplot por cada variable con su respectivo componente principal (CP).

## Resultados y discusión

El análisis de varianza detectó diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) entre ambientes (A), entre genotipos (G) y en la interacción genotipo\*ambiente (IG\*A) para todas las variables evaluadas (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Cuadrados medios y nivel de significancia mediante el modelo AMMI de seis variables de maíces Tuxpeños: 'C0', 'C14' y 'C19' evaluados en el estados de Veracruz y Estado de México (2013-2014).**

**Table 2. Average squares and significance level using the AMMI model of six Tuxpeños maize variables: 'C0', 'C14' and 'C19' evaluated in the state of Veracruz and Estado de Mexico (2013-2014).**

FV	GL	REN	IF	PH	PIG	PEG	GEG
A	5	11.56**	1196.03**	170.21**	0.44**	0.45**	11.63**
G	2	17.15**	7066.05**	147.5**	0.01**	0.42**	0.39**
IG*A	10	2.54**	510.05**	4.65**	0.03**	0.35**	0.42**
CP1	6	3.31**	540.12**	7.18**	0.03**	0.44**	0.61**
CP2	4	1.39	464.94**	0.85	0.02**	0.22**	0.14**
CP1 (P <sub>i</sub> )	6	78.08	63.53	92.61	72	74.99	86.08
CP2 (P <sub>i</sub> )	4	100	100	100	100	100	100
Error	34	0.75	3.01	1.58	0.002	0.04	0.04
CV	-	34.88	3.35	1.73	3.46	3.44	1.95
$\bar{X}$	-	2.48	51.83	72.41	1.35	6.19	10.44

\*\*=  $p \leq 0.01$ ; FV= fuente de variación; A= ambiente; G= genotipos; IG\*A= interacción genotipo\*ambiente; CP= componente principal; P<sub>i</sub>= porcentaje acumulado; CV= coeficiente de variación;  $\bar{X}$ = promedio de la variable; GL= grados de libertad; REN= rendimiento (t ha<sup>-1</sup>); IF= índice de flotación; PH= peso hectolítrico (kg hL<sup>-1</sup>); PIG= pedicelo de grano (%); PEG= pericarpio de grano (%); GEG= germen de grano (%).

### Estabilidad del rendimiento

La significancia de la IG\*A ( $p \leq 0.01$ ) del REN, indica que al menos uno de los genotipos evaluados tuvo mejor comportamiento o adaptación a un ambiente específico;

(PIG), pericarp (PEG) and germ (GEG) of the grain were determined following the methodology described by Salinas and Vázquez (2006).

### Statistic analysis

Yield and physical characteristics of grain data were analyzed with AMMI model (Zobel *et al.*, 1988, Crossa, 1990), using SAS statistical package for Windows, version 9.0 (SAS Institute, 2002). This model generated a biplot graph for each variable with its respective main component (CP).

## Results and discussion

Analysis of variance found highly significant differences ( $p \leq 0.01$ ) between environments (A), between genotypes (G) and genotype\*environment interaction (IG\*A) for all variables evaluated (Table 2).

### Yield stability

The significance of the IG\*A ( $p \leq 0.01$ ) of REN, indicates that at least one of the tested genotypes showed better performance or adaptation to a specific environment;

igualmente, el CP1 fue altamente significativo, el cual se formó por la suma de cuadrados de la IG\*A, que explicó 78.08% de la variabilidad. Sin embargo, el CP2 no fue significativo y solo representó el 21.92%, ambos componente observaron 100% de la variabilidad (Cuadro 2).

De acuerdo con Gauch y Zobel (1989), el modelo AMMI combina la técnica del análisis de varianza y del análisis de CP en términos multiplicativos, para explicar la variabilidad de la IG\*A, a través de una gráfica simultánea. En el gráfico dimensional, el CP1 (eje de las ordenadas) expresa las diferencias en los efectos principales aditivos (G y A), con valores positivos o negativos, considerando que mientras más alejados estén de este eje, habrá más IG\*A, y los de menor distancia al eje, serán más estables. Por otro lado, el efecto interacción multiplicativo (eje de las abscisas) se desplaza de menor a mayor (de derecha a izquierda) de acuerdo con una escala propia de la variable, donde las líneas perpendiculares a este eje tendrán medias similares. En conclusión, los G o A más alejados a los ejes de las ordenadas serán más influenciados por la IG\*A y viceversa (Zobel *et al.*, 1988).

La Figura 1A muestra que los genotipos con baja IG\*A; es decir, aquellos que mantuvieron su comportamiento a través de ambientes fueron el 'C0' 'original' y el 'C14' 'intermedio', con un rendimiento promedio de 1.6 y 2.2 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente; mientras que el genotipo 'C19' 'avanzado' tuvo una alta IG\*A a través de localidades, pero presentó el rendimiento promedio más alto, con 3.5 t ha<sup>-1</sup> (igualando la media nacional según SIAP, 2015), lo que representa un aumento de 45.7% con respecto al rendimiento del ciclo 'C0'. Los resultados indican que la SMV ha sido efectiva en aumentar las frecuencias génicas favorables para el rendimiento y la adaptación en el maíz Tuxpeño 'V-520C', a través de 19 ciclos de selección, a pesar de haber sido evaluado tanto en clima tropical (origen) como en templado (adaptado), superando a los ciclos inferiores 0 y 14 en el rendimiento de grano. Al respecto, Pérez *et al.* (2000, 2007) encontraron resultados similares en variedades de la raza Tuxpeño, donde los ciclos más avanzados en SMV fueron de mayor rendimiento que los ciclos inferiores.

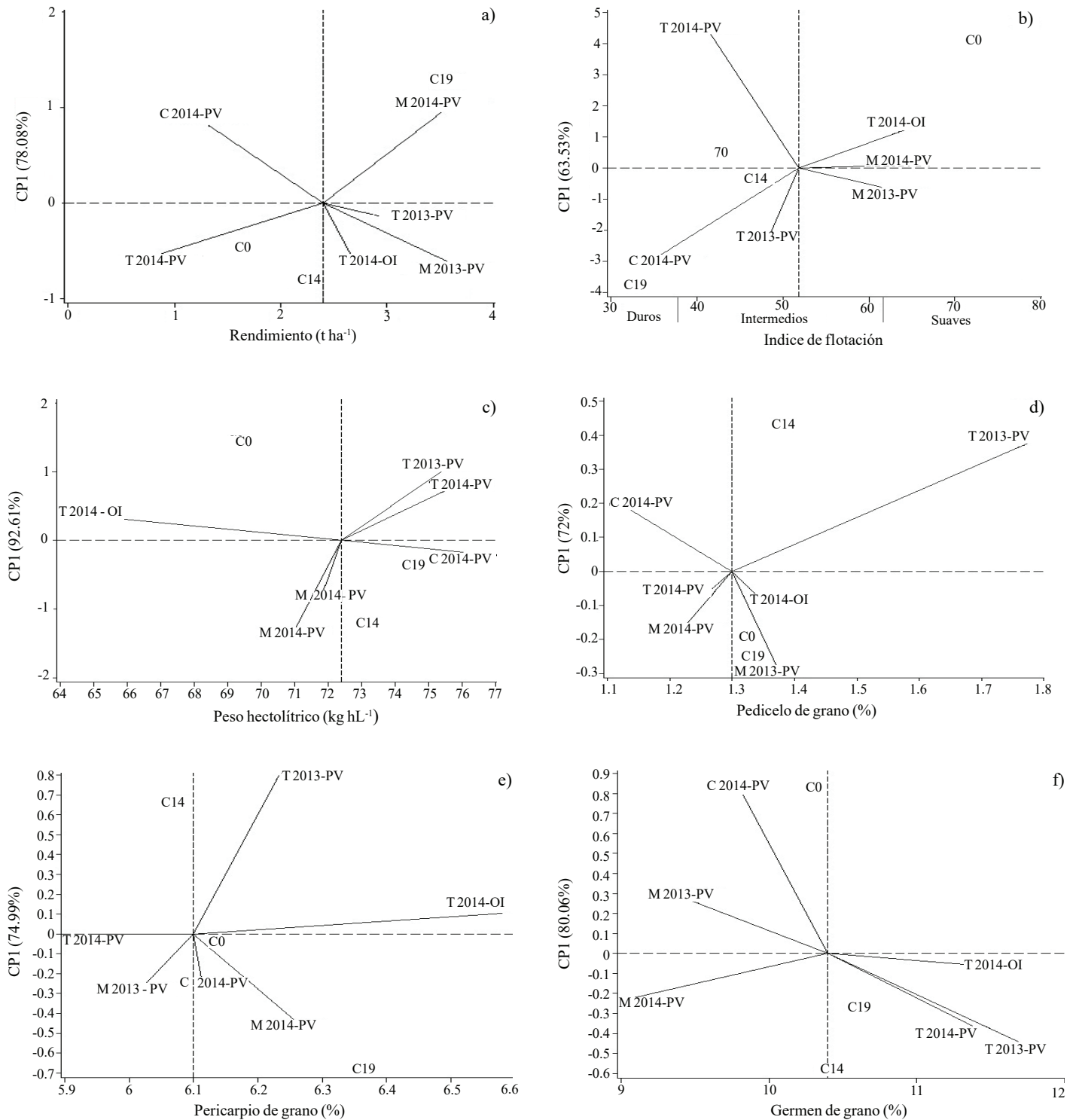
Por otra parte, la localidad de Montecillo para el ciclo agrícola 2013 (M 2013-PV) y 2014 (M 2014-PV) registró los rendimientos más altos (Figura 1a). De acuerdo con la longitud de vectores los ambientes discriminaron entre los tres genotipo.

likewise, CP1 was highly significant, which was formed by the sum of squares of IG\*A, which explained 78.08% of the variability. However, CP2 was not significant and only accounted for 21.92%, both components showed 100% of variability (Table 2).

According to Gauch and Zobel (1989), the AMMI model combines the technique of analysis of variance and the analysis of CP in multiplicative terms, to explain the variability of the IG\*A, through a simultaneous graph. In the dimensional chart, CP1 (axis of the ordinates) expresses the differences in the main additive effects (G and A), with positive or negative values, considering that the further away from this axis, there will be more IG\*A, and the ones with smaller distance to the axis, will be more stable. On the other hand, the multiplicative interaction effect (axis of the abscissa) shifts from lower to higher (from right to left) according to a scale of the variable, where the lines perpendicular to this axis will have similar means. In conclusion, G or A farther to the axes of ordinates will be more influenced by the IG\*A and vice versa (Zobel *et al.*, 1988).

Figure 1A shows that genotypes with low IG\*A; that is, those who maintained its behavior across environments were the 'C0' 'Original' and 'C14' 'intermediate', with an average yield of 1.6 and 2.2 t ha<sup>-1</sup>, respectively; while genotype 'C19' 'advanced' showed a high GI\*A across locations, but showed the highest average yield, 3.5 t ha<sup>-1</sup> (equaling the national average by SIAP, 2015), representing an increase of 45.7% with respect to the yield of the 'C0' cycle. The results indicate that SMV has been effective in increasing favorable gene frequencies for yield and adaptation in Tuxpeño 'V-520C' maize, through 19 selection cycles, despite having been evaluated in both tropical (origin) and in tempered (adapted), surpassing the inferior cycles 0 and 14 in the grain yield. In this regard, Pérez *et al.* (2000, 2007) found similar results in varieties of the Tuxpeño breed, where the more advanced cycles in SMV showed higher yields than the lower cycles.

On the other hand, the Montecillo locality for the agricultural cycle 2013 (M 2013-PV) and 2014 (M 2014-PV) recorded the highest yields (Figure 1a). According to the vectors length the environments discriminated between the three genotypes.



**Figura 1. Promedios de rendimiento de grano (a), índice de flotación (b), peso hectolítrico (c), pedicelo de grano (d), pericarpio de grano (e), germen de grano (f) y coeficientes del CP1 para la interacción genotipo\*ambiente de maíces Tuxpeños: ‘C0’, ‘C14’ y ‘C19’ de SMV en el estado de Veracruz (T= Tepetates) y Estado de México (M= Montecillos y C= Coatlinchán), 2013-2014.**

**Figure 1. Average grain yield (a), flotation index (b), hectoliter weight (c), grain pedicel (d), grain pericarp (e), grain germ (f) and CP1 coefficients for the genotype\*environment interaction of Tuxpeño maize: ‘C0’, ‘C14’ and ‘C19’ of SMV in the state of Veracruz (T= Tepetates) and Estado de Mexico (M= Montecillos and C= Coatlinchán), 2013-2014.**



Específicamente se puede mencionar que los ambientes de Montecillo (M2014-PV, M2013-PV), Coatlinchán (C2014-PV) y Tepetates (T2014-PV) presentaron efectos similares en la discriminación de los genotipos; en cambio, la localidad de Tepetates en las evaluaciones: T2013-PV y T2014-OI, no discriminaron bien entre genotipos, esto pudo deberse a que no fue el ambiente donde se realizó la SMV. Los dos ambientes de Montecillo (2013-PV y 2014-PV) tuvieron un rendimiento promedio igual al del genotipo 'C19' ( $3.5 \text{ t ha}^{-1}$ ), seguido por los ambientes T2014-OI y T2013-PV, este último fue el más estable; sus rendimientos promedios fueron de  $2.6$  y  $2.9 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente. Por último, los ambientes con el menor rendimiento fueron: C2014-PV y T2014-PV, con  $1.3$  y  $0.8 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente.

Los altos rendimientos observados en M2013-PV y M2014-PV se explican porque Montecillo fue el ambiente de selección, además, esta localidad tuvo buena humedad en el suelo, pues se sembró con un riego inicial y posteriormente se aplicaron tres riegos auxiliares; también hubo una buena distribución de lluvia, temperaturas medias óptimas antes de los días a floración femenina (DFF) y durante el periodo de llenado de grano (Figura 2a), se fertilizó con una mayor dosis de N y P, y los suelos tienen un alto contenido de arcilla (Cuadro 1). En este sentido, Barrales *et al.* (1984) afirman que el rendimiento está asociado no sólo con la cantidad, sino también con la distribución de agua durante el periodo de floración femenina, etapa muy sensible al déficit de humedad, ya que al estar húmedo y expuesto el jilote es más probable que el polen se quede ahí, aumentando así el rendimiento. El rendimiento bajo en T2014-PV estuvo influenciado por un exceso de agua mal distribuida durante todo el desarrollo de la planta (Cuadro 1 y Figura 2b).

De la misma manera, el ambiente de C2014-PV pudo estar influenciado por un suelo de poca profundidad (Phaeozem) y pobre en P (Cuadro 1), aunado a esto, se tuvo una irregular distribución de la precipitación, ya que poco antes de la floración femenina (DFF) hubo un déficit hídrico notable (Figura 2a). Los sitios T2013-PV y T2014-OI tuvieron rendimientos de  $2.9$  y  $2.6 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente, ligeramente arriba de la media (Figura 1a). La localidad T2013-PV mostró mayor rendimiento que su homólogo T2014-PV, los resultados podrían atribuirse a un mayor volumen de lluvia durante los días de floración femenina en 2013 (Figura 2b); sin embargo, la precipitación estuvo mal distribuida, lo que provocó dos déficits: uno antes y otro durante los DFF, por lo cual pudo afectar el periodo de llenado de grano y reducir el rendimiento como lo informaron Tanaka y Yamaguchi

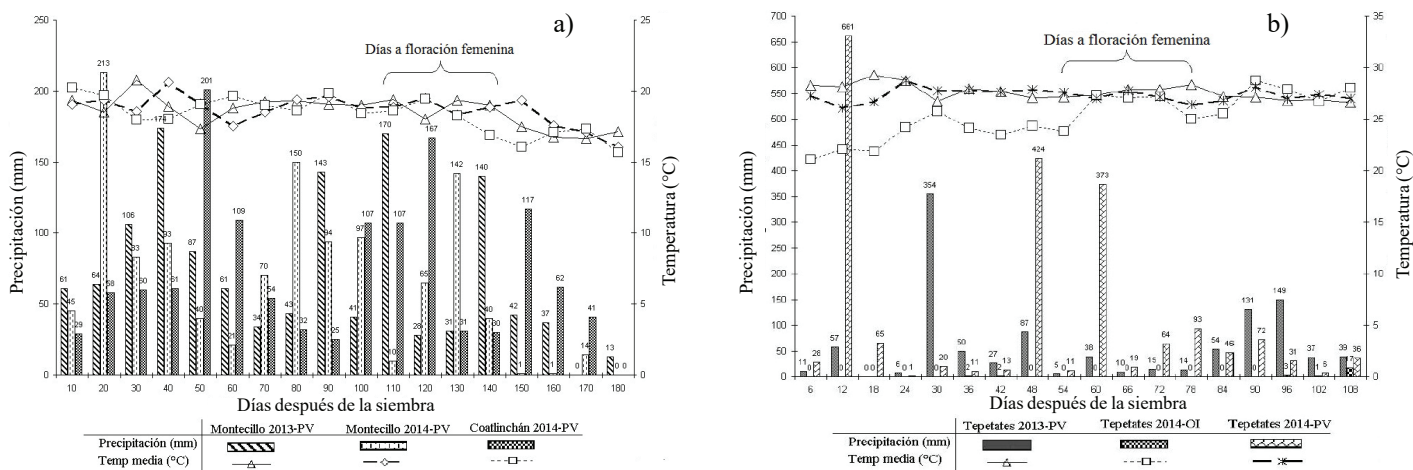
Specifically, it can be mentioned that the environments of Montecillo (M2014-PV, M2013-PV), Coatlinchán (C2014-PV) and Tepetates (T2014-PV) showed similar effects on genotype discrimination; in contrast, the town of Tepetates in the evaluations: T2013-PV and T2014-OI did not discriminate well between genotypes, this could be due to the fact that it was not the environment where the SMV was performed. The two Montecillo environments (2013-PV and 2014-PV) had an average yield equal to 'C19' genotype ( $3.5 \text{ t ha}^{-1}$ ), followed by T2014-OI and T2013-PV environments, the latter was the most stable; its average yields were  $2.6$  and  $2.9 \text{ t ha}^{-1}$ , respectively. Finally, environments with lower yield were: C2014-PV and T2014-PV, with  $1.3$  and  $0.8 \text{ t ha}^{-1}$ , respectively.

The high yields observed in M2013-PV and M2014-PV are explained because Montecillo was the selection environment; in addition, this locality had a good soil moisture, since it was planted with an initial irrigation and three irrigations were subsequently applied; there was also a good rainfall distribution, optimal average temperatures before the days at female flowering (DFF) and during the grain filling period (Figure 2a), a higher dose of N and P was used to fertilize, and the soils have a high clay content (Table 1). Here, Barrales *et al.* (1984) state that yield is associated not only with quantity but also with the distribution of water during the period of female flowering, a very sensitive stage to moisture deficit, since when the shoots are wet and exposed, the pollen is more likely to stay there, thus increasing the yield. The low yield in T2014-PV was influenced by an excess of poorly distributed water throughout the plant's development (Table 1 and Figure 2b).

In the same way, the environment of C2014-PV might have been influenced by a shallow soil (Phaeozem) and poor in P (Table 1), in addition, there was a poor distribution of precipitation, since shortly before female flowering (DFF) there was a remarkable water deficit (Figure 2a). The T2013-PV and T2014-OI sites had yields of  $2.9$  and  $2.6 \text{ t ha}^{-1}$ , respectively, slightly above the average (Figure 1a). The T2013-PV locality showed higher yields than its T2014-PV counterpart, the results could be attributed to a higher rainfall volume during female flowering days in 2013 (Figure 2b); however, the precipitation was poorly distributed, causing two deficits: one before and the other during the DFF, which could affect the period of grain filling thus reducing yield as reported by Tanaka and Yamaguchi (1972). A similar situation occurred in

(1972). Algo similar se presentó en T 2014-OI, donde las temperaturas fueron altas y hubo poca precipitación y riego, que causó estrés hídrico durante todo el desarrollo de la planta (Figura 2a). Al respecto, Rincón *et al.* (2006) mencionan que uno de los factores que más efecto tienen en la planta es la alta temperatura (>25 °C), pues ésta llega a reducir significativamente el rendimiento de grano y la acumulación de la biomasa, siendo la mazorca la más perjudicada, seguida por un déficit de N en las dos localidades (Cuadro 1).

T 2014-OI, where temperatures were high and there was little rainfall and irrigation, which caused water stress throughout the development of the plant (Figure 2b). In this regard, Rincón *et al.* (2006) mentioned that one of the factors that have the greatest effect on the plant is the high temperature (>25 °C), as this results in a significant reduction of grain yield and biomass accumulation, with the cob being the most harmed, followed by a deficit of N in the two localities (Table 1).



**Figura 2. Relaciones termopluviométricas de tres localidades, por municipio: a) Texcoco, México y b) Manlio Fabio Altamirano, Veracruz (2013-2014).**

**Figure 2. Thermopluviometric relationships of three localities, by municipality: a) Texcoco, México and b) Manlio Fabio Altamirano, Veracruz (2013-2014).**

**Estabilidad de las características físicas de grano**

El análisis AMMI detectó alta significancia en todos los cuadrados medios, para G, A e IG\*A, CP1 y CP2 de las variables índice de flotación (IF), peso hectolítrico (PH), porcentaje de pedicelo (PIG), porcentaje de pericarpio (PEG), y porcentaje de germen (GEG); excepto PH en el CP2 que no resultó significativo. El CP1, explicó la mayor variabilidad en las variables PH y GEG, con 92.61 y 86.08%, respectivamente, y fue el IF donde se explicó el menor porcentaje de la variabilidad, con 63.53% (Cuadro 2).

**Stability of physical characteristics of grain**

The AMMI analysis detected high mean values for G, A and IG\*A, CP1 and CP2 of the variables flotation index (IF), hectolitic weight (PH), pedicel percentage (PIG), pericarp percentage (PEG), and germ percentage (GEG); except PH at CP2 that was not significant. The CP1, explained the highest variability in the PH and GEG variables, with 92.61 and 86.08%, respectively, and it was the FI where the lowest percentage of variability was explained, with 63.53% (Table 2).

Para el IF, el genotipo más estable por la dureza de sus granos fue el ‘C14’, y los más inestables fueron ‘C0’ y ‘C19’, las localidades de mayor estabilidad (baja IG\*A) fueron las M 2013-PV y M 2014-PV, que también fueron las de mayor rendimiento (Figura 1b). Por otra parte, los ambientes C 2014-PV y T 2014-PV fueron los más inestables para esta variable (también los de menor rendimiento). De acuerdo con

For the IF, the most stable genotype due to the hardness of its grains was ‘C14’, and the most unstable were ‘C0’ and ‘C19’, the most stable localities (low IG\*A) were M 2013-PV and M 2014-PV, which also showed the highest yield (Figure 1b). On the other hand, the environments C 2014-PV and T 2014-PV were the most unstable for this variable (also those of lower yield). According to the scale reported by Salinas

la escala reportada por Salinas y Vázquez (2006) para IF, las mazorcas de 'C0' tuvieron granos de endospermo suave (IF= 72), los granos del C14 fueron de endospermo intermedio (IF= 49) y los granos del 'C19' fueron de endospermo duro (IF= 33). La IG\*A, mostró que únicamente en C 2014-PV se obtuvieron granos de textura dura (IF= 13-37), mientras que en las localidades de Montecillo 2013 y 2014, así como en Tepetates 2013 y 2014 (todas de temporal), la textura del grano fue intermedia (IF= 38-62), quedando únicamente los granos de T 2014-OI como suaves (IF= 63-87).

Los genotipos de grano duro, fueron los de mayor rendimiento, resultados que previamente fueron informados por Vázquez *et al.* (2012). También, se pudo observar que la adaptación del maíz Tuxpeño con la SMV en los Valles Altos está estrechamente relacionada con el IF, pues a mayor selección aumentó la dureza de grano; por tanto, el genotipo de grano suave ('C0' con IF= 72) cambió a grano duros en el ciclo 'C19' (IF= 33); es decir, se redujo en 54.2% el IF. Lo anterior puede atribuirse a la genética del maíz y a las condiciones ambientales, que pudieron haber modificado la organización y distribución de las cadenas de amilopectina en el granulo de almidón, así como a la matriz proteínica presente alrededor de los gránulos de almidón (Agama-Acevedo *et al.*, 2013), así como a la SMV "año con año", logrando así de manera indirecta una mayor dureza de grano. Por su parte, Salinas *et al.* (2013) encontraron para otra variedad de la raza Tuxpeño un IF de 51, lo cual es diferente al resultado de 'V520C' ('C0' con un IF de 72), esto pudo deberse a las diferencias entre variedades, pero también a que dicho estudio se hizo en el estado de Oaxaca, en condiciones diferentes a las de Valles Altos. Con base en el IF, los genotipos 'C14' y 'C19' son adecuados para la elaboración de tortillas siguiendo el método tradicional de la IMT. Ningún genotipo alcanzó el grado de dureza demandado por la IHN (IF < 20) (Figura 1b).

En el PH el CP1 explicó 92.62% de la IG\*A (Cuadro 2). El gráfico biplot para este parámetro reveló que el genotipo más estable fue el 'C19', así como el de mayor peso hectolítrico (74.8 kg hL<sup>-1</sup>), mientras que los genotipos 'C14' y 'C0' tuvieron valores de 73.5 y 69.2 kg hL<sup>-1</sup> respectivamente, siendo inestables entre ambientes (Figura 1c); el genotipo 'C0' fue el más inestable (más alejado al eje de las ordenadas) con interacción positiva, debido a su baja frecuencia de genes para adaptación a Valles Altos. En cuanto a las localidades, ninguna discriminó bien entre genotipos, pero la más estable en la IG\*A fue C 2014-PV, tal localidad alcanzó los valores

and Vázquez (2006) for IF, 'C0' cobs had soft endosperm grains (IF= 72), C14 grains showed intermediate endosperm (IF= 49) and grains of 'C19' had hard endosperm (IF= 33). The IG\*A, showed that only C 2014-PV had hard grains (IF= 13-37), whereas in Montecillo 2013 and 2014, as well as in Tepetates 2013 and 2014 (all rainfed), the grain texture was intermediate (IF= 38-62), leaving only the 2014-OI grains as soft (IF= 63-87).

Durum grain genotypes had the highest yields, results previously reported by Vázquez *et al.* (2012). Also, it was observed that the adaptation of the Tuxpeño maize with the SMV in Valles Altos is closely related to the FI, because to a greater selection the grain hardness increased; therefore, the soft grain genotype ('C0' with IF= 72) changed to hard grain in the 'C19' cycle (IF= 33); that is, the IF was reduced by 54.2%. This can be attributed to maize genetics and environmental conditions, which may have altered the organization and distribution of amylopectin chains in the starch granule, as well as the protein matrix present around the starch granules (Agama-Acevedo *et al.*, 2013) and the SMV "year after year" indirectly achieving greater grain hardness. Meanwhile, Salinas *et al.* (2013) found for another variety of the Tuxpeño breed an IF of 51, which is different from the result of 'V520C' ('C0' with an IF of 72), this could be due to differences between varieties, but also because that study was performed in the state of Oaxaca, under different conditions from those of Valles Altos. Based on the IF, the genotypes 'C14' and 'C19' are suitable for the preparation of tortillas following the traditional method of IMT. No genotype reached the hardness degree demanded by the IHN (IF < 20) (Figure 1b).

In PH, CP1 accounted for 92.62% of IG\*A (Table 2). The BIPLLOT graph for this parameter revealed that the most stable genotype was the 'C19' as well as the one with the highest test weight (74.8 kg hL<sup>-1</sup>), while genotypes 'C14' and 'C0' values were 73.5 and 69.2 of kg hL<sup>-1</sup> respectively, being unstable between environments (Figure 1c); the genotype 'C0' was the most unstable (most remote to the axis of the ordinates) with positive interaction, due to its low frequency of genes for adaptation to Valles Altos. Regarding to localities, none of them discriminated well between genotypes, but the most stable in the IG\*A was C 2014-PV, this locality reached the highest values for PH (76 kg hL<sup>-1</sup>), while T 2014-OI had the lowest overall mean (64.6 kg hL<sup>-1</sup>). The localities with most diverse PH (less stable) were M 2013-PV and T 2013-PV.

más altos para PH ( $76 \text{ kg hL}^{-1}$ ), en tanto que en T 2014-OI se registró la media general más baja ( $64.6 \text{ kg hL}^{-1}$ ). Las localidades con mayor diversidad en el PH (menos estables) fueron M 2013-PV y T 2013-PV.

Las localidades que superaron la media del PH fueron C 2014-PV, T 2014-PV y T 2013-PV, las cuales tuvieron una buena precipitación, pero mal distribuida (Figura 2b), y sus condiciones edafoclimáticas no fueron menos favorables (Cuadro 1). El ambiente con menor PH fue T 2014-OI, los resultados podrían atribuirse a una cantidad mínima de precipitación y riego durante el ciclo de cultivo, lo que limitó el desarrollo del grano (Tanaka y Yamaguchi, 1972). En ambientes con mayor precipitación o riego, el peso hectolítrico fue alto. Por otra parte, el 'C19' (material con mayor número de ciclos de SMV) fue el que mostró mayor PH ( $>74 \text{ kg hL}^{-1}$ ) entre genotipos y entre localidades, por lo que se considera adecuado para la IMT e IHN; esto pudo ser debido a que el grano de este genotipo fue menos largo, lo que pudo provocar una mayor compactación (mayor número de granos en el recipiente) al momento de obtener PH. Se observó una correlación significativa entre PH e IF ( $r = -0.72, p \leq 0.01$ ), resultados que coinciden con lo indicado por Vázquez *et al.* (2012), así los genotipos con mayor PH fueron los de menor IF.

Para el porcentaje de pedicelo (PIG) se observó alta significancia ( $p \leq 0.01$ ) en la IG\*A, además, su CP1 explicó 72% de su interacción (Cuadro 2). De acuerdo con la Figura 1d, el genotipo más estable para PIG fue 'C0', el cual tuvo un promedio bajo (1.33%), los genotipos 'C19' (1.34%), y 'C14' (1.37%) fueron inestables. El 'C14' tuvo mayor PIG, también mayor IG\*A; es decir, menor estabilidad. La localidad que mejor discriminó entre genotipos, de mayor a menor, fue T 2013-PV, con un promedio de 1.77% (más alto), seguida por M 2013-PV (1.37%) y C 2014-PV, con una media general de 1.13% (más bajo). El sitio más estable para PIG fue T 2014-PV, seguido por T 2014-OI y M 2014-PV, con promedios de 1.26%, 1.33% y 1.22%, respectivamente.

Los resultados del PIG concuerdan con Salinas *et al.* (2010), quienes evaluaron materiales híbridos tropicales en Veracruz, cuyos porcentajes fueron 1.3 a 1.5%. De igual manera, Aragón *et al.* (2012) encontraron que el PIG en su colecta SS-551 de la raza Tuxpeño fue 1.31%, siendo muy similar al PIG del genotipo 'C0' (1.33%), que es el material original de la misma raza. El porcentaje de PIG de los genotipos 'C0' y 'C19' fueron estables en los ambientes de estudio, todos los genotipos tuvieron valores de PIG menores al 2% demandado como máximo por la IHN.

The localities that surpassed the PH average were C 2014-PV, T 2014-PV and T 2013-PV, which had a good but poorly distributed precipitation (Figure 2b), and their edaphoclimatic conditions were not less favorable (Table 1). The environment with lower PH was T 2014-OI, the results could be attributed to a minimum amount of precipitation and irrigation during the crop cycle, which limited grain development (Tanaka and Yamaguchi, 1972). In environments with greater precipitation or irrigation, the hectoliter weight was high. Moreover, the 'C19' (material with more SMV cycles) showed the highest pH ( $>74 \text{ kg hL}^{-1}$ ) between genotypes and between locations, so it is considered suitable for IMT and IHN; this might be because the grain of this genotype was shorter, which could cause a greater compaction (greater number of grains in the container) when obtaining PH. A significant correlation between pH and IF was found ( $r = -0.72, p \leq 0.01$ ), matching the indicated by Vázquez *et al.* (2012), thus the genotypes with higher PH were those of lower IF.

For pedicel percentage (PIG) high significance ( $p \leq 0.01$ ) was observed in the IG\*A, in addition its CP1 explained 72% of its interaction (Table 2). According to Figure 1d, the most stable genotype for PIG was 'C0', which showed a low average (1.33%), genotypes 'C19' (1.34%), and 'C14' (1.37%) were unstable. The 'C14' that had the highest PIG, also had a higher IG\*A; that is, less stability. The locality that best discriminated between genotypes, from highest to lowest, was T 2013-PV, with an average of 1.77% (highest), followed by M 2013-PV (1.37%) and C 2014-PV, with an overall mean of 1.13% (the lowest). The most stable site for PIG was T 2014-PV, followed by T 2014-OI and M 2014-PV, with averages of 1.26%, 1.33% and 1.22%, respectively.

PIG results agree with those of Salinas *et al.* (2010), who evaluated tropical hybrid materials in the State of Veracruz, whose percentages were between 1.3 and 1.5%. Similarly, Aragón *et al.* (2012) found that the PIG in its collection SS-551 of the Tuxpeño breed was 1.31%, being very similar to the PIG of the 'C0' genotype (1.33%), which is the original material of the same breed. The percentage of PIG of the genotypes 'C0' and 'C19' were stable through the study environments, all genotypes had PIG values lower than 2% demanded as maximum by the IHN.

The percentage of grain pericarp (PEG) was highly significant ( $p \leq 0.01$ ) among G, A, IG\*A, and in the mean square of CP1 and CP2, which accounted for 74.99% and 25.01% of the variation, respectively (Table 2). Figure

El porcentaje de pericarpio de grano (PEG) tuvo alta significancia ( $p \leq 0.01$ ) entre G, A, IG\*A, y en los cuadrados medios de los CP1 y CP2, que explicaron 74.99% y 25.01% de la variación, respectivamente (Cuadro 2). La Figura 1e muestra los promedios generales del PEG que registraron los genotipos, los cuales fueron, de menor a mayor: 'C14' (6.07%), 'C0' (6.13%) y 'C19' (6.36%), siendo el más estable 'C0', mientras que 'C19' y 'C14' fueron inestables; es decir, tuvieron mayor IG\*A, pero el genotipo 'C14' registró la menor media general. Entre localidades, las que mejor discriminaron a los genotipos fueron T 2013-PV y T 2014-OI, pues 'V-520C' y sus compuestos de selección son originarios de Veracruz. T 2014-PV fue el ambiente más estable para PEG y donde se produjeron los granos con menor porcentaje (5.93%). En tanto, T 2014-OI, se observó un comportamiento inverso, teniendo el mayor porcentaje de PEG (6.58%) y la mayor inestabilidad (Figura 1e). Resultados que fueron superiores a los informados por Salinas *et al.* (2013) y Aragón *et al.* (2012) quienes informaron valores entre 5.4% y 4.8% en la raza Tuxpeño.

Estas diferencias en el porcentaje muchas veces dependen del tipo de maíz y de su calidad nutricional y rendimiento (Aragón *et al.*, 2012). Tomando en cuenta el porcentaje del 'C19', y dado que éste fue superior al de los ciclos inferiores, se infiere que la SMV afectó dicha variable; esto pudo suceder indirectamente cuando se realizaba la SMV, donde el criterio de selección fue el rendimiento de grano "año con año", ya que no se observó un incremento del porcentaje de PER asociado al ciclo de selección (Figura 1e). Todas las localidades de estudio y los genotipos evaluados registraron porcentajes de pericarpio superiores a los demandados por la IHN, la cual requiere materiales con valores entre 4.5% a 5.5%.

Para el porcentaje del germen (GEG) los dos primeros componentes (CP1 y CP2) explicaron el 100% de la variabilidad (Cuadro 2). Se observó una marcada división entre las localidades del Estado de México y Veracruz, quedando los genotipos en medio de tal división (Figura 2f). El genotipo más estable para GEG fue 'C19', con una media de 10.60%, continuando 'C14', con 10.43%, y seguido por 'C0', con 10.31%, que fue el menos estable. En las localidades C 2014-PV y T 2013-PV se observó la mayor discriminación entre genotipos para GEG, mientras que el ambiente más estable en cuanto a la IG\*A fue T 2014-OI, lo cual pudo verse favorecido por la disponibilidad de agua durante el desarrollo y reproducción del cultivo.

1e shows the general averages of the PEG that recorded the genotypes, which were, from lowest to highest: 'C14' (6.07%), 'C0' (6.13%) and 'C19' (6.36%), being the most Stable 'C0', whereas 'C19' and 'C19' were unstable; that is, showed higher IG\*A, but the genotype 'C14' recorded the lowest overall mean. Among localities, the ones that discriminated best the genotypes were T 2013-PV and T 2014-OI, since 'V-520C' and its selection compounds originated in Veracruz. T 2014-PV was the most stable environment for PEG and where the grains with the lowest percentage (5.93%) were produced. Meanwhile, T 2014-OI, an inverse behavior was observed, with the highest percentage of PEG (6.58%) and greater instability (Figure 1e). Results that were higher than those reported by Salinas *et al.* (2013) and Aragón *et al.* (2012) who reported values between 5.4% and 4.8% in the Tuxpeño breed.

These differences in the percentage often depend on the type of maize and its nutritional quality and yield (Aragón *et al.*, 2012). Taking into account the percentage of 'C19', and given that this was higher than the lower cycles, it is inferred that SMV affected that variable; this could happen indirectly when SMV was performed, where the selection criterion was the "year-by-year" grain yield, since no increase in the percentage of PER associated to the selection cycle was observed (Figure 1e). All study sites and evaluated genotypes recorded higher percentages of pericarp than those demanded by the IHN, which requires materials with values ranging from 4.5% to 5.5%.

For the germ percentage (GEG) the first two components (CP1 and CP2) explained 100% of the variability (Table 2). It was observed a marked division between the localities of the Estado de México and Veracruz, leaving the genotypes in the middle of such division (Figure 2f). The most stable genotype for GEG was 'C19', with a mean of 10.60%, continuing 'C14', with 10.43%, and followed by 'C0', with 10.31%, which was the least stable genotype. In the localities C 2014-PV and T 2013-PV, the greatest discrimination between genotypes for GEG was observed, while the most stable environment for IG\*A was T 2014-OI, which could be favored by the availability of water during the development and reproduction of the crop. The genotypes produced in Valles Altos had a lower percentage of GEG: M 2014-PV (9.06%, the lowest), M 2013-PV (9.44%) and C 2014-PV (9.81%), while Veracruz had higher means: T 2014-OI (11.31%), T 2014-PV (11.37%) and T 2013-PV (11.68%, the highest).

Los genotipos producidos en Valles Altos tuvieron menor porcentaje de GEG: M 2014-PV (9.06%, baja), M 2013-PV (9.44%) y C 2014-PV (9.81%), mientras que las localidades de Veracruz fueron medias mayores: T 2014-OI (11.31%), T 2014-PV (11.37%) y T 2013-PV (11.68%, alta).

En el Estado de México donde se tuvo una mejor distribución de la precipitación, menor temperatura y mayor dosis de nitrógeno (Cuadro 1 y Figura 2a), los genotipos rindieron más y sus granos fueron más duros, pero con germen de tamaño reducido, observándose lo contrario en Tepetates, que de acuerdo con Tanaka y Yamaguchi (1972) puede deberse a la mayor temperatura en Tepetates, Veracruz, durante el desarrollo del cultivo. Los resultados para germen en los tres ambientes de Tepetates ( $x=11.4\%$ ), fueron semejantes a los de Salinas *et al.* (2013) para variedades de la raza Tuxpeño, cultivada en Veracruz, por otra parte, Zepeda *et al.* (2009) informaron porcentajes de GEG entre 8.7 a 11 en maíces híbridos evaluados en Valles Altos, aspectos que están acordes con los resultados de este estudio. Los porcentajes de GEG y de PIG se correlacionaron significativamente ( $r=0.51$ ,  $p\leq 0.01$ ), indicando que los genotipos con más germen también tuvieron mayores porcentajes de pedicelo. En el porcentaje de germen, todos los genotipos, en todas las localidades cumplieron con los requisitos de la IHN ( $\leq 12\%$ ).

Al margen de los ambientes, el REN, PH, PEG y el GEG de los genotipos se incrementó paralelamente con el avance de la SMV, lo cual pudo suceder durante la selección para la adaptación 'año con año', donde las frecuencias alélicas hicieron cambios favorables para tales características indirectamente, resultados similares fueron encontrados por De Jesús *et al.* (1990) y Pérez *et al.* (2000) con Tuxpeño Crema 1 evaluados solo en Valles Altos de México, donde la SMV produjo cambios significativos en atributos de planta y mazorca entre los ciclos: C2-C11 y C2-C12, respectivamente. En tanto el IF disminuyó por el mismo efecto de adaptación, mientras que PIG se mantuvo, posiblemente es una característica menos afectada por el ambiente, resultados también observados por Zepeda *et al.* (2009); Salinas *et al.* (2010) para ambas características.

## Conclusiones

Las condiciones agroclimáticas de Montecillo Estado de México, resultaron favorables para el mejoramiento de la productividad y de la calidad industrial del maíz

En Estado de México, where there was a better distribution of precipitation, a lower temperature and a higher dose of nitrogen (Table 1 and Figure 2a), the genotypes yielded more and its grains were harder, but with reduced germ size. Contrary with what was observed in Tepetates, which and according to Tanaka and Yamaguchi (1972) may be due to the higher temperature in Tepetates, Veracruz, during the development and reproduction of the crop. The germ results for the three environments in Tepetates ( $x=11.4\%$ ) were similar to those reported by Salinas *et al.* (2013) for Tuxpeño breed varieties grown in Veracruz, on the other hand, Zepeda *et al.* (2009) reported GEG percentages between 8.7 and 11 in hybrid maize evaluated in Valles Altos, aspects that are in line with the results of this paper. GEG and PIG percentages were significantly correlated ( $r=0.51$ ,  $p\leq 0.01$ ), indicating that the genotypes with more germ also had higher pedicel percentages. In the germination percentage, all the genotypes, in all the localities, fulfilled the requirements of the IHN ( $\leq 12\%$ ).

Despite the environment, REN, PH, PEG and GEG of the genotypes increased in parallel with the progress of the SMV, which may have happened during selection for the year-to-year adaptation, where allele frequencies made favorable changes for such characteristics indirectly, similar results were found by De Jesús *et al.* (1990) and Pérez *et al.* (2000) with Tuxpeño Crema 1 evaluated only in Valles Altos of México, where SMV produced significant changes in plant and cob attributes between cycles C2-C11 and C2-C12, respectively. While the IF decreased by the same adaptation effect while PIG remained possibly it is a characteristic less affected by the environment, results also observed by Zepeda *et al.* (2009); Salinas *et al.* (2010) for both characteristics.

## Conclusions

The agroclimatic conditions of Montecillo, Estado de Mexico, were favorable for the yield improvement and industrial quality of Tuxpeño maize with 19 cycles ('C19') of visual mass selection. With regard to 'C0' the yield of 'C19' increased 45.7% and the flotation index decreased 54.2%, in addition 'C19' was the most stable for hectoliter weight and percentage of grain germ, obtaining a yield of 3.5 t ha<sup>-1</sup>, flotation index of 33 (corresponding to hard grains), test weight of 74.8 kg hL<sup>-1</sup>, pericarp percentage of 6.36% and germ percentage 10.6%. The evaluated characteristics

Tuxpeño con 19 ciclos ('C19') de Selección Masal Visual. Respecto al 'C0' el rendimiento del 'C19' se incrementó 45.7% y el índice de flotación se redujo 54.2%, además 'C19' fue el más estable para peso hectolítrico y porcentaje de germen de grano, obteniendo un rendimiento de 3.5 t ha<sup>-1</sup>, índice de flotación de 33 (correspondiente a granos duros), peso hectolítrico de 74.8 kg hL<sup>-1</sup>, porcentaje de pericarpio de 6.36% y porcentaje de germen de 10.6%. Las características evaluadas cumplieron con lo establecido por la norma NMX-034(1), para maíces destinados al proceso de nixtamalización tradicional. Por tanto, se infiere que el genotipo 'C19' con mayor Selección Masal Visual del maíz Tuxpeño 'V-520C' adaptado a los Valles Altos de México, contribuyó a aumentar la productividad y disponer de un grano con calidad para la industria de la masa y la tortilla.

## Literatura citada

- AACC (American Association of Cereal Chemists). 2016. Approved Methods of Analysis. 11<sup>th</sup> Ed. AACC. The Association. St. Paul, MN. USA.
- Abdullah, A. and Barnawi, A. 2012. Identification of the type of agriculture suited for application of wireless sensor networks. *Rus. J. Agric. Socio. Econ. Sci.* 12(2):19-36.
- Agame, A. E.; Juárez, G. E.; Evangelista, L. S.; Rosales, R. O. L. and Bello, P. L. A. 2013. Characteristics of maize starch and relationship with its biosynthesis enzymes. *Agrociencia.* 47:1-12.
- Aragón, C. F.; Figueroa, C. J. de D.; Flores, Z. M.; Gaytán, M. M. y Vélez, M. J. J. 2012. Calidad industrial de maíces nativos de la Sierra Sur de Oaxaca. INIFAP. Oaxaca, México. Libro técnico núm. 15. 249 p.
- Barrales, D. S.; Muñoz, O. A. y Sotres, R. D. 1984. Relaciones termopluviométricas en familias de maíz bajo condiciones de temporal. *Agrociencia.* 58:127-139.
- Bellon, M. R.; Adato, M.; Becerril, J. and Mindek, D. 2005. Impact of improved germplasm on poverty alleviation: the case of Tuxpeño-derived materials in México. *CIMMYT. D. F., México.* 58 p.
- Castillo, G. F. 1993. La variabilidad genética y el mejoramiento de los cultivos. *Ciencia.* 44:69-79.
- Crossa, J. 1990. Statistical analysis of multilocation trials. *Adv. Agron.* 44:55-85.
- 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.
- Fasahat, P.; Muhammad, K.; Abdullah, A.; Rahman, B. M. A.; Siing, N. M.; Gauch, J. H. G. and Ratnam, W. 2014. Genotype\*environment assessment for grain quality traits in rice. *Communications in Biometry and Crop Science.* 9(2):71-82.
- Figueroa, C. J. D.; Acero, G. M. G.; Vasco, M. N. L.; Lozano, G. A.; Flores, A. L. M. y González, H. J. 2001. Fortificación y evaluación de tortillas de nixtamal. *Arch. Latinoam. Nutr.* 51(3):293-302.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía (2<sup>da</sup> edición). Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). D. F., México. 246 p.
- complied with the established by the standard NMX-034 (1), for maize destined to the traditional nixtamalization process. Therefore, it is inferred that the 'C19' genotype with the highest visual mass selection of the Tuxpeño 'V-520C' maize adapted to Valles Altos of México contributed to increase yield and to obtaining a quality grain for the dough and the tortilla industry.

*End of the English version*



- Gauch, H. G. and Zobel, R. W. 1989. Accuracy and selection success in yield trial analyses. *Theoretical and Applied Genetics.* 77:473-481.
- González, H. A.; Sahagún, C. J.; Vázquez, G. L. M.; Rodríguez, P. J. E.; Pérez, L. D. J.; Domínguez, L. A.; Franco, M. O. y Balbuena, M. A. 2009. Identificación de variedades de maíz sobresalientes considerando el modelo AMMI y los índices de Eskridge. *Agric. Téc. Méx.* 35(2):189-200.
- Hristov, N.; Mladenov, N.; Djuric, V.; Kondic, S. A.; Marjanovic, J. A. and Simic, D. 2010. Genotype by environment interactions in wheat quality breeding programs in southeast Europe. *Euphytica.* 174:315-324.
- Martínez, G. A. 1988. Diseños experimentales. Métodos y elementos de teoría. Trillas. México. 756 p.
- Molina, G. J. D. 1983. Selección masal visual estratificada en maíz. Centro de Genética, Colegio de Postgraduados. Chapingo. Estado de México. México. 36 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.* 34:533-542.
- SIAP. 2015. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera de la Secretaría de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. Cierre de la producción agrícola por cultivo. [http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola\\_siap\\_gb/ientidad/index.jsp](http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ientidad/index.jsp).
- Pérez, C. A.; Molina, G. J. D. y Martínez, G. A. 2002. Adaptación 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.; 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.
- Rincón, T. J. A.; Castro, N. S.; López, S. J. A.; Huerta, A. J.; Trejo, L. C. y Briones, E. F. 2006. Temperatura alta y estrés hídrico durante la floración en poblaciones de maíz tropical. *Bot. Exp.* 75:31-40.
- Salinas, M. Y. y Vázquez, C. G. 2006. Metodologías de análisis de la calidad nixtamalero-tortillera en maíz. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Valle de México. Chapingo, Estado de México. Folleto técnico núm. 23. México. 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, M. Y.; Aragón, C. F.; Ybarra, M. C.; Aguilar, V. J.; Altunar, L. B. y Sosa, M. E. 2013. Caracterización física y composición química de razas de maíz de grano azul/morado de las regiones tropicales y subtropicales de Oaxaca. *Rev. Fitotec. Mex.* 36(1):23-31.
- 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. Secretaría de Economía (SE). Dirección General de Normas. México, D. F. 18 p.
- SE (Secretaría de economía). 2012. Análisis de la cadena de valor de la tortilla de maíz: estado actual y factores de competencia local. SE-Departamento General de Industrias Básicas. Disponible en: [http://www.economia.gob.mx/files/comunidadnegocios/industria\\_comercio/informacionsectorial/20120411\\_analisis\\_cadena\\_valor\\_maiz-tortilla.pdf](http://www.economia.gob.mx/files/comunidadnegocios/industria_comercio/informacionsectorial/20120411_analisis_cadena_valor_maiz-tortilla.pdf).
- Statistical Analysis System (SAS). 2002. The SAS System for Windows 9.0. User's guide. Cary, N. C. USA. 584 p.
- Tanaka, A. and Yamaguchi, J. 1972. Dry matter production, yield components and grain yield of the maize plant. *J. Fac. Agric.* 57(1):71-132.
- Torres, F. J. L.; Morales, R. E. J.; González, H. A.; Laguna, C. A. y Córdova, O. H. 2011. Respuesta de híbridos trilineales y probadores de maíz en valles altos del centro de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2(6):829-844.
- Vázquez, C. G.; García, L. S.; Salinas, M. Y.; Bergvinson, D. J. and Palacios, R. N. 2011. Grain and tortilla quality in landraces and improved maize grown in the highlands of Mexico. *Plant Foods for Human Nutrition.* 66:203-208.
- 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, 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.
- Wen, W.; Franco, J.; Chávez, T. 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.
- Zepeda, B. R.; Carballo, C. A. y Hernández, A. C. 2009. Interacción genotipo-ambiente en la estructura y calidad del nixtamal-tortilla del grano en híbridos de maíz. *Agrociencia.* 43:695-706.
- Zobel, W. R.; Wright, M. J. and Gauch, J. H. G. 1988. Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.* 80(3):388-393.2