



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENÉTICA**

**ESTABILIDAD EN EL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD PARA TORTILLAS DE
MAÍZ TUXPEÑO ADAPTADO A VALLES ALTOS**

FERNANDO LÓPEZ MORALES

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE**

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2017

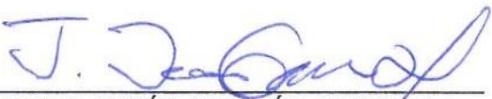
La presente tesis, titulada: **ESTABILIDAD EN EL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD PARA TORTILLAS DE MAÍZ TUXPEÑO ADAPTADO A VALLES ALTOS**, realizada por el alumno: **Fernando López Morales**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

**RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENÉTICA**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: 
DR. TARSICIO CORONA TORRES

ASESOR: 
DR. J. JESÚS GARCÍA ZAVALA

ASESORA: 
DRA. MA. GRICELDA VÁZQUEZ CARRILLO

ASESOR: 
DR. SERAFÍN CRUZ IZQUIERDO

ASESOR: 
DR. GUSTAVO LÓPEZ ROMERO

ASESOR: 
DR. DELFINO REYES LÓPEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de Mexico, Enero de 2017

ESTABILIDAD EN EL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD PARA TORTILLAS DE MAÍZ TUXPEÑO ADAPTADO A VALLES ALTOS

Fernando López Morales, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2017

RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) en México es muy diverso y es el cultivo con la mayor superficie sembrada, donde la mayor proporción de la producción es destinada para la alimentación humana en cantidades significativas y en diferentes productos. La raza Tuxpeño ha destacado por su alto rendimiento y una buena calidad de grano para la elaboración de nixtamal y tortilla. Esta raza predomina en el Estado de Veracruz, entre altitudes de 0 a 500 m, donde se tiene clima cálido subhúmedo. En los Valles Altos Centrales de México (> 2200 msnm), una variedad representativa de la raza Tuxpeño V-520C, ciclo cero (C0) de origen tropical fue sometida a 14 (C14) y 19 (C19) ciclos de Selección Masal Visual (SMV) para su adaptación “año con año”. Con el fin de conocer la adaptación y estabilidad, así como saber si las tres poblaciones cumplen con lo establecido por las industrias procesadoras para su comercialización, entre los años 2013 y 2014, se evaluaron las tres poblaciones C0, C14 y C19, utilizando un diseño bloques completos al azar con tres repeticiones. Las evaluaciones se realizaron tanto en su ambiente original, cálido subhúmedo en el Estado de Veracruz, como en su ambiente de selección, templado subhúmedo en el Estado de México (Valles Altos), contando con tres ensayos por zona. Los análisis multivariados de los modelos AMMI (efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas) y SREG (sitios de regresión), pudieron dimensionar la estabilidad y la adaptación de los genotipos en los ambientes evaluados. Todo indica que la SMV presentó efectos significativos en el comportamiento del maíz de la raza Tuxpeño. Especialmente, el genotipo C19 (con más ciclos de SMV) mostró mayor adaptación y estabilidad que sus ciclos inferiores, además fue el genotipo con el mejor rendimiento de grano (3.5 t ha^{-1}). Este mismo material redujo los días a las floraciones, las alturas de plantas, el número de hojas totales y los tamaños de la espiga, e incrementó los componentes de rendimiento (caracteres de la mazorca). Asimismo, mejoró la calidad para grano, nixtamal, masa y tortilla. Tales características fueron favorables para la industria de la masa-tortilla. El ambiente de Montecillos Primavera-Verano 2013 y 2014 tuvo los mismos rendimientos de grano que el C19, además el genotipo contó con una buena adaptación y estabilidad para la calidad de grano, nixtamal y tortillas.

Palabras clave: *Zea mays* L., adaptación y estabilidad, AMMI y SREG, calidad de nixtamal y tortilla, características morfológicas.

STABILITY OF YIELD AND QUALITY OF TORTILLA OF TUXPEÑO MAIZE ADAPTED TO HIGH VALLEYS OF MEXICO

Fernando López Morales, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2017

ABSTRACT

Maize (*Zea mays* L.) in Mexico is very a diverse species and is the most grown crop. Most of the maize production in Mexico is allocated for human food in significant amounts and for use it in different products. The Tuxpeño maize race has stood out because of its yield and good grain quality in the making of boiled maize ‘nixtamal’ and tortilla. This kind of maize prevails in Veracruz State, from 0 to 500 m altitude, where the type of climate is warm and sub-humid. In the Central High Valleys of Mexico (> 2200 m), a representative variety of Tuxpeño V-520C cycle zero (C0), from a tropical source was subjected to 14 (C14) and 19 (C19) cycles of Visual Mass Selection (VMS) for its year-to-year adaptation. The aim of this work was to know the adaptation, stability, and to know whether the three types of population meet the commercialization standards set by the processing industries. Between 2013 and 2014 the three types of populations C0, C14, and C19 were evaluated in a randomized complete block design with three replications. The evaluations were performed in their original environment, in a warm and sub humid type climate in Veracruz, and in their selection environment; mild and sub humid in State of Mexico (High Valleys). Three trials were performed in each location. The Multi Variety Analysis Model (additive main effects, and multiplicative interactions) and SREG (regression sites) were able to measure the stability and adaptation of genotypes in the assessed environments. Results indicated that the VMS showed significant effects in the performance of the Tuxpeño maize race. Specially, the C19 genotype (with more MVS cycles) showed more adaptation and stability than its inferior cycles. Moreover, C19 was the genotype that showed the best grain yield (3.5 t ha⁻¹). This same material reduced the number of days to flowering, the plant height, the total amount of leaves, and the size of the ear. It also increased the yield components (traits of the ear). Likewise, it improved the quality of grain, boiled maize, dough, and tortilla. Such characteristics were favorable for dough-tortilla industry. The Summer-Spring 2013 and 2014 environments in Montecillo obtained the same grain yielding for C19. In addition, the genotype had good adaptation and stability for grain quality, boiled maize, and tortillas.

Key words: *Zea mays* L., adaptation and stability, AMMI and SREG, boiled maize and tortilla quality, morphological characteristics.

DEDICATORIA

A mi mamá **Catalina Morales Sánchez**†, quien dedicó gran parte de su vida para mi formación; que con su ejemplo y sabiduría supo guiarme y motivarme para llegar hoy, a esta etapa tan importante de mi vida. Te doy gracias donde quieras que te encuentres, querida mamá.

A mi papá **Tomas López López**, quien me ha apoyado incondicionalmente en todo este camino recorrido, que con su experiencia y sabiduría me ha aconsejado en cualquier situación; gracias por tu infinito apoyo.

A mi hermana **Eloina Sánchez Morales**, quien es un ejemplo de perseverancia, trabajo y esfuerzo diario; gracias por tu apoyo, comprensión y cariño. Tú eres ese pilar perfecto, sin ti no lo hubiera logrado, gracias por todo.

A mi sobrina **María José Corona Sánchez**, de quien espero que algún día pueda compartir una experiencia similar a esta; solo te quiero recordar que pienses bien lo que deseas, porque todo lo que pienses se puede volver realidad.

A mis maestras **Leonor Torres Belmont y Judith Torres Cravioto**†, quienes con sus sabios consejos y amplios conocimientos han sabido sembrar en mí, el valor de la constancia y el amor al estudio del “oro verde”, hoy con todo cariño y respeto, les doy gracias por todo su apoyo invaluable.

A mis padrinos **José Luis San Martín y Guadalupe García Enríquez**, quienes me han compartido su hogar y alimento: gracias por todo su apoyo incondicional.

A todos mis familiares y amigos que han estado conmigo en las buenas y en las malas; gracias por su comprensión y cariño y por ser parte de esta etapa tan importante de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Pueblo de México que, a través del **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** de nuestro país, me brindó el apoyo económico para realizar mis estudios de doctorado.

A los miembros de mi Consejo Particular: el Dr. José Domingo Molina Galán†, por facilitarme el germoplasma evaluado en esta investigación, al Dr. Tarsicio Corona Torres (Consejero), al Dr. J. Jesús García Zavala, al Dr. Serafín Cruz Izquierdo, al Dr. Gustavo López Romero, al Dr. Delfino Reyes López y la Dra. María Gricelda Vázquez Carrillo, por tantas horas dedicadas a esta investigación, por toda su disposición, apoyo incondicional y sus enseñanzas, pero también por sus comentarios y sugerencias en las revisiones para mejorar esta investigación, mil gracias a todos. Así mismo se agradece al Dr. Gilberto Esquivel Esquivel por su apoyo y sugerencias en gran parte de esta tesis.

Al mismo tiempo, agradezco al **Colegio de Postgraduados Campus Veracruz** por facilitarme los terrenos de evaluación, y al **Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)**, Campo Experimental Valle de México, que me proporcionó espacio para evaluar uno de los ensayos. Así mismo, agradezco al personal del laboratorio de calidad de maíz por permitirme evaluar la calidad del grano, masa y tortilla para esta investigación.

Agradezco a mis queridísimos amigos: Verónica, Noemí, Olga, Enrique, Lusmila, Floriberto, Luz María y María Corina, por compartir un momento especial, llenos de alegrías en esta etapa tan importante en mi vida, mil gracias por toda su amistad, comprensión y consejos.

Por último, quiero agradecer a la institución del **Colegio de Postgraduados Campus Montecillo**, que me permitió realizar mis estudios de doctorado, especialmente al **Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad-Genética** y a todo el grupo de académico expertos que lo conforman, quienes desde el inicio hasta el final, me formaron para enfrentarme a los cambios y retos que vive la agricultura de nuestro país, la cual cuidaré, atenderé y trabajaré en beneficio de la grandeza del pueblo mexicano.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. Revisión de literatura	1
2. Objetivos	4
3. Hipótesis.....	4
4. Literatura citada	5
CAPÍTULO I. INTERACCIÓN GENOTIPO-AMBIENTE, ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO Y CALIDAD DE GRANO EN MAÍZ TUXPEÑO	10
1.1 RESUMEN.....	10
1.2 ABSTRACT.....	11
1.3 INTRODUCCIÓN	12
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS	14
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
1.6 CONCLUSIONES	25
1.7 LITERATURA CITADA	26
CAPÍTULO II. RENDIMIENTO Y CAMBIOS ADAPTATIVOS MORFOLÓGICOS EN MAÍZ TUXPEÑO ADAPTADO A VALLES ALTOS MEDIANTE SELECCIÓN MASAL	32
2.1 RESUMEN.....	32
2.2 ABSTRACT.....	33
2.3 INTRODUCCIÓN	34
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	36
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
2.6 CONCLUSIONES	53
2.7 LITERATURA CITADA	54
CAPÍTULO III. ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO Y CALIDAD DE TORTILLA DE MAÍZ TUXPEÑO ADAPTADO A VALLES ALTOS, MÉXICO	58
3.1 RESUMEN.....	58

3.2 ABSTRACT	59
3.3 INTRODUCCIÓN	60
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS	61
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
3.6 CONCLUSIONES	78
3.7 LITERATURA CITADA	78
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES GENERALES	85

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1.1 Características del manejo agronómico y condiciones ambientales de las localidades de evaluación.....	15
Cuadro 1.2 Cuadrados medios y nivel de significancia mediante el modelo AMMI de seis variables de maíces Tuxpeños: ‘C0’, ‘C14’ y ‘C19’ evaluados en los Estados de Veracruz y México (2013-2014)	16
Cuadro 2.1 Características edafoclimáticas de las seis localidades de evaluación de los maíces Tuxpeños: C0, C14, C19, y CU de los Estados de Veracruz y México.....	37
Cuadro 2.2 Cuadrados medios del análisis combinado con maíces Tuxpeños (primero), análisis de Valles Altos (segundo) y análisis de Veracruz (tercero), 2013-2014.....	40
Cuadro 2.3 Promedios de 18 variables del análisis combinado con maíces Tuxpeños (primero), promedios de Valles Altos (segundo) y promedio del Estado de Veracruz (tercero), 2013-2014	44
Cuadro 3.1 Características del manejo agronómico y condiciones ambientales de las localidades de evaluación.....	62
Cuadro 3.2 Cuadrados medios y nivel de significancia de los componentes del modelo SREG en rendimiento y variables de calidad de nixtamal, masa y tortilla de maíz Tuxpeño, evaluado en los Estados de Veracruz y México (2013-2014).....	65
Cuadro 3.3 Medias de los genotipos y ambientes del rendimiento y variables de calidad de nixtamal, masa y tortilla de maíz Tuxpeño, evaluado en los Estados de Veracruz y México (2013-2014).....	69

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 Promedios de rendimiento de grano (A), índice de flotación (B), peso hectolítrico (C), pico de grano (D), pericarpio de grano (E), germen de grano (F) y coeficientes del CP1 para la interacción genotipo x ambiente de maíces Tuxpeños: ‘C0’, ‘C14’ y ‘C19’ de SMV en los Estados de Veracruz y México, 2013-2014.....	18
Figura 1.2 Relaciones termopluviométricas de tres localidades, por municipio: (A) Texcoco, México; (B) Manlio Fabio Altamirano, Veracruz (2013-2014).....	20
Figura 2.1 Localización de los municipios y localidades donde se realizaron los experimentos con su tipo de clima	37
Figura 3.1 Biplot de los dos componentes principales del rendimiento de grano (A), pérdida de materia seca (B), pericarpio retenido (C), humedad de nixtamal (D), humedad de masa (E), humedad de tortilla a las 24 horas (F), rendimiento de tortilla fría (H) y fuerza de rompimiento de la tortilla (I) del modelo SREG con maíz Tuxpeño, evaluado en los Estados de Veracruz y México (2013-2014).....	67

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. Revisión de literatura

El maíz (*Zea mays* L.) es el grano más importante del mundo para la alimentación humana y animal, ya que supera en producción al trigo (*Triticum aestivum* L.) y al arroz (*Oryza sativa* L.), y es solamente rebasado por la producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en tallo (FAOSTAT, 2016). En México, como en muchos países del mundo, el maíz sirve de materia prima para la industria (OCDE/FAO, 2014). El maíz es el principal cultivo de México, contando con más de la mitad de la superficie total cultivada, la cual es aproximadamente ocho millones de hectáreas, cultivada por 2.5 a 3 millones de agricultores anualmente. Este cultivo se siembra en todas las entidades del territorio nacional; en el centro-suroeste se concentra el 86 % de la superficie sembrada (autoconsumo), mientras que la parte norte de país cuenta con el 14 % de la superficie sembrada (fines comerciales) (Bellon *et al.*, 2009; Kato *et al.*, 2009). Según cifras del SIAP (2015), la producción de maíz en México para 2015 fue de 19, 513, 876 t de grano, con un rendimiento promedio nacional de 3.5 t ha⁻¹ de grano (SIAP, 2015).

En México la diversidad genética del maíz suma 59 razas (Sánchez *et al.*, 2000), por lo que este país se considera como el centro de origen, domesticación y diversificación de este cultivo; tal diversidad se debe a que en cada región existen variedades locales adaptadas a las condiciones climáticas, edáficas, altitudinales y de manejo, que al mezclarse crean ambientes específicos para producir maíz con ciertas características morfológicas. Aunado a esto, se puede agregar la diversidad de usos y costumbres donde el maíz es el eje principal (Muñoz, 2005; Kato *et al.*, 2009), además de ser causa y efecto del origen de las civilizaciones prehispánicas (Camacho, 2016).

La gran diversidad de maíz y la superficie sembrada en México hacen que la mayor proporción de la producción sea destinada para la alimentación humana en cantidades

significativas y en diferentes productos. Para los mexicanos, el maíz es un componente esencial en la dieta, por ello se consumen en promedio 200 kg *per cápita* (Aragón *et al.*, 2006), de los cuales 120 kg se consumen en forma de tortillas, 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.

Dentro de las 59 razas de maíz en México, la raza Tuxpeño ha destacado por su alto rendimiento, buen vigor, cierta tolerancia a la sequía, resistencia a plagas y enfermedades, así como una buena calidad de grano para la elaboración de nixtamal y tortilla (Bellon *et al.*, 2005; Salinas *et al.*, 2010; Wen *et al.*, 2012). Esta raza predomina en el Estado de Veracruz, entre altitudes de 0 a 500 m y donde prevalecen condiciones climáticas del trópico húmedo (Wellhausen *et al.*, 1951).

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 los Valles Altos (Castillo, 1993). Este bajo porcentaje se explica por los problemas de adaptabilidad que presentan la mayoría de razas cuando se siembran fuera de su ambiente (Holley y Goodman, 1988), por lo que requieren de un proceso de selección para su adaptación a otros lugares (Goodman, 2002). Sin embargo, se tienen evidencias de uso de germoplasma de maíz tropical y subtropical adaptado a climas templados mediante Selección Masal Visual (SMV) con ganancias en rendimiento y adaptabilidad (Pérez *et al.*, 2002; 2007). Específicamente, la raza Tuxpeño se pudo adaptar a Valles Altos Centrales de México con este método (>2200 msnm) (Molina, 1983; De Jesús *et al.*, 1990; Pérez *et al.*, 2000).

En las últimas dos décadas, se han realizado análisis multivariados mediante la aplicación de los modelos AMMI (efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas) y SREG (sitios de regresión), para estimar la estabilidad y la adaptación del rendimiento en el cultivo

de maíz. Estos modelos están basados en el análisis de componentes principales y mediante la representación simultánea de genotipos y ambientes en un gráfico biplot, donde se identifican los materiales sobresalientes en ambientes específicos; los dos modelos interpretan gráficamente la respuesta de los genotipos, de los ambientes y de la interacción genotipo por ambiente (IG*A) (González *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2001; Vázquez *et al.*, 2012). Asimismo, estos dos modelos se han empleado para determinar la estabilidad de la calidad de cereales básicos, como el maíz (Vázquez-Carrillo *et al.*, 2016), el trigo (Castillo *et al.*, 2012) y el arroz (Fasahat *et al.*, 2014).

Con base en lo anterior, varias investigaciones han permitido estudiar la diversidad genética y la adaptación de razas tropicales y subtropicales a Valles Altos Centrales, pero pocos trabajos se han realizado bajo tres aspectos específicos: 1) El maíz V-520C de la raza Tuxpeño fue adaptado a Valles Altos por 14 y 19 ciclos de Selección Masal Visual (SMV) y estos ciclos se evaluaron junto con el material original; 2) Realizar tres ensayos por cada zona objetivo, tanto en clima original (cálido subhúmedo, Veracruz), como en clima adaptado (templado subhúmedo, Edo. México), es decir, los genotipos ya adaptados a Valles Altos se regresaron a Veracruz, lugar de origen, junto con un testigo de la raza Chalqueño; 3) Usar los modelos estadísticos de AMMI y SREG en características de calidad de grano, de nixtamalización y de tortilla; al mismo tiempo, se hicieron comparaciones de los cambios adaptativos con características morfológicas. Por lo que no hay antecedentes de estos muy importantes aspectos y específicamente en las zonas donde se realizó la presente investigación.

La presente tesis está organizada en cuatro capítulos, donde los tres primeros corresponden a artículos científicos, como siguen: El Capítulo I, Interacción genotipo-ambiente, estabilidad del rendimiento y calidad de grano en maíz Tuxpeño (enviado a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas). El Capítulo II, Rendimiento y cambios adaptativos morfológicos en maíz

Tuxpeño adaptado a Valles Altos mediante Selección Masal. El Capítulo III, Estabilidad con SREG del rendimiento y calidad de tortilla del maíz tuxpeño adaptado a valles altos, México. Por último, el Capítulo IV abarcó las conclusiones generales.

2. Objetivos

- Estudiar la estabilidad y adaptación de los cambios adaptativos morfológicos, calidad de grano y de tortilla del maíz Tuxpeño sometido a 14 y 19 ciclos de Selección Masal Visual (SMV) en Valles Altos Centrales, evaluados junto con el genotipo original, tanto en el clima adaptado (Edo. de México), como en el clima original (Edo. de Veracruz).
- Determinar la interacción genotipo x ambiente y la estabilidad del rendimiento y características físicas del grano de maíz Tuxpeño con diferentes ciclos de SMV, mediante el modelo de AMMI.
- Precisar los cambios adaptativos morfológicos en planta, mazorca y en el rendimiento y sus componentes del maíz V-520C Tuxpeño seleccionado durante varios ciclos de SMV en Valles Altos.
- Definir la estabilidad del rendimiento y de variables de calidad de tortillas del maíz V-520C Tuxpeño adaptado con SMV a Valles Altos de México, evaluado en el Edo. de México y Veracruz, analizados mediante el uso de SREG.

3. Hipótesis

- Existe por lo menos un genotipo superior de maíz V-520C Tuxpeño estable y adaptado a las condiciones ambientales donde fueron evaluados, gracias a la SMV practicada, con características morfológicas, calidad de grano y de totilla idóneas para la producción e industrias procesadoras.

- El maíz V-520C Tuxpeño con el mayor número de ciclos adaptado por SMV en Valles Altos tendrá menor interacción genotipo x ambiente y mayor estabilidad del rendimiento y características físicas del grano, entre todos los ambientes evaluados.
- La SMV ha sido efectiva para lograr adaptar el maíz V-520C Tuxpeño tropical a condiciones de Valles Altos, por lo que, el ciclo de selección más avanzado tendrá mayor rendimiento y mejores caracteres morfológicos (planta y mazorca), expresados en cambios morfológicos de adaptación por efecto de la selección.
- El maíz Tuxpeño V-520C más avanzado en la SMV será el más estable y adaptado a los ambientes de Valles Altos, el cual tendrá alto rendimiento y características de calidad de tortilla idóneas para las industrias procesadoras.

4. Literatura citada

Aragón, C. F.; Taba, S.; Hernández, C. J. M.; Figueroa, C. J. de D. y Serrano, A. V. 2006. Actualización sobre maíces criollos de Oaxaca. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Informe final SNIB. CONABIO proyecto Núm. CS002, México D.F. 119 p.

Bellón, 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. México, D. F. CIMMYT. 58 p.

Bellon, M. R.; Barrientos, P. A. F.; Colunga, G. P.; Perales, H.; Reyes, A. J. A.; Rosales, S. R. y Zizumbo, V. D. 2009. Diversidad y conservación de recursos genéticos en plantas cultivadas. In: Capital natural de México, Volumen II: Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO, México. pp. 355-382.

Camacho, S. F. 22 de noviembre de 2016. Maíz, causa del origen de civilización prehispánica: científicos. *La Jornada*. Disponible en:

<http://www.jornada.unam.mx/ultimas/2016/11/22/maiz-causa-del-origen-de-civilizacion-prehispanica-cientificos> (Noviembre 2016).

Castillo, D.; Matus, I.; del Pozo, A.; Madariaga, R. and Mellado, M. 2012. Adaptability and genotype \times environment interaction of spring wheat cultivars in Chile using regression analysis, AMMI, and SREG. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 72(2): 167-174.

Castillo, G. F. 1993. La variabilidad genética y el mejoramiento de los cultivos. *Ciencia* (número especial) 44: 69-79.

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 \times environment assessment for grain quality traits in rice. *Communications in biometry and crop science*. 9(2): 71-82.

Figuroa, 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. *Archivo Latinoamericano de Nutrición*. 51(3): 293-302.

González, H. A.; Sahagún, C. J.; Vázquez, G. L. M.; Rodríguez, P. J. E.; Pérez, L. D. de 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. *Agricultura Técnica en México*. 35(2): 189-200.

Goodman, M. M. 2002. New sources of germplasm: Lines, transgenes and breeders. *In: El fitomejoramiento ante los avances científicos y tecnológicos*. Martínez, M. J.; Rincón, S. F. y Martínez, Z. G. (eds). Simposio. Buenavista, Saltillo, Coahuila. 2 de septiembre. UAAAN-SOMEFI, A. C. pp. 28-41.

Holley, R. N. and Goodman, M. M. 1988. Yield potential of tropical hybrid maize derivatives. *Crop Science* 28(2): 213-218.

- Kato, Y. T. A.; Mapes, S. C.; Mera, O. L. M.; Serratos, H. J. A. y Bye, B. R. A. 2009. Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. 116 p.
- Molina, G. J. D. 1983. Selección masal visual estratificada en Maíz. Publicación especial. Centro de genética, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 36 p.
- Muñoz, O. A. 2005. Centli-Maíz. Prehistoria e Historia, Diversidad, Potencial, Origen Genético y Geográfico, Glosario Centli-Maíz. (2° edición). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 210 p.
- Organización para la agricultura y la alimentación de las naciones unidas, división de estadística (FAOSTAT). 2016. Disponible en: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E> (Junio de 2016).
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Perspectivas Agrícolas 2014-2023 (OCDE-FAO). 2014. OECD Publishing. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2014-es (Junio de 2015).
- 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.
- Pérez, C. A. 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. *Fitotecnia Mexicana* 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.

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. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 1(4): 509-523.

Sánchez, G. J. J.; Goodman, M. M. and Stuber, C. W. 2000. Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of México. *Economic Botany*. 54: 43-59.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (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. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do (Noviembre 2016).

Vázquez, C. M. G.; Santiago, R. D.; Salinas, M. Y.; Rojas, M. I.; Arellano, V. J. L.; Velázquez, C. G. A. y Espinosa, A. C. 2012. Interacción genotipo-ambiente del rendimiento y calidad de grano y tortilla de híbridos de maíz en valles altos de Tlaxcala, México. *Fitotecnia Mexicana*. 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 Science*. 56: 3090–3099.

Wellhausen, J. E.; Roberts, M. L. y Hernández, X. E. en colaboración con Mangelsdorf, P. C. 1951. Razas de maíz de México, su origen, características y distribución. *Xolocotzia*. Tomo II. *Revista de Geografía Agrícola*. pp. 609-732.

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.

Yan, W.; Cornelius, P. L.; Crossa, J. and Hunt, L. A. 2001. Two types of GGE Biplots for analyzing multi-environment trial data. *Crop Science*. 41: 656-663.

CAPÍTULO I

INTERACCIÓN GENOTIPO-AMBIENTE, ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO Y CALIDAD DE GRANO EN MAÍZ TUXPEÑO

1.1 RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) es componente esencial de la dieta de los mexicanos, con un consumo *per cápita* promedio de 134 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 la interacción genotipo x 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. Entre los años 2013 y 2014, se evaluó la población original 'C0' y los ciclos 'C14' y 'C19' de SMV, tanto en su ambiente original, cálido subhúmedo 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 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 t ha¹), sobresaliendo 'C19', que también para PH fue el de mayor valor y el más estable.

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

GENOTYPE-ENVIRONMENT INTERACTION, STABILITY OF YIELD AND GRAIN QUALITY IN TUXPEÑO MAIZE

1.2 ABSTRACT

Maize (*Zea mays* L.) is an essential component of the Mexican diet, whose *per capita* consumption is about 134 kg. The Tuxpeño maize is one of the races with the highest yields, and with a wide adaptation to the tropics, so that once adapted to temperate climate, it is necessary to evaluate the quality of their grain parameters for the processing industries. In this research the genotype x environment interaction for yield and grain quality of Tuxpeño maize cycles 14 and 19 of Visual Mass Selection (SMV) for adaptation to the High Valleys of Mexico was studied. Between 2013 and 2014, the original population ('C0') and its advanced cycles of SMV, 'C14' and 'C19', were evaluated both in its original environment, the humid tropics in the state of Veracruz, and in its selection environment in the State of Mexico, where prevail temperate humid conditions. The evaluated traits were: grain yield (REN), flotation index (IF), test weight (PH), pedicel, pericarp and grain germ. Data were analyzed with the model AMMI (additive main effects and the multiplicative interactions). Results indicated that selection for adaptation, cropping conditions and the effect of the environment during the development of plants favorably modified the REN and some of the physical characteristics and grain quality of genotypes. In Montecillo 2013-PV and 2014-PV it was obtained the best yield (3.5 t ha⁻¹), highlighting 'C19', which also had the highest value and stability for PH.

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

1.3 INTRODUCCIÓN

En México, el maíz (*Zea mays* L.) se siembra aproximadamente en ocho millones de hectáreas, por lo que es el cultivo con mayor superficie agrícola (Bellon *et al.*, 2009; Kato *et al.*, 2009), con un rendimiento promedio de 3.1 t ha⁻¹ (SIAP, 2013). El maíz es componente esencial de la dieta de los mexicanos, con un consumo promedio de 134 kg *per cápita* (Aragón *et al.*, 2006), de los cuales 120 kg se consumen en forma de tortillas, 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 y calidad de grano (Bellon *et al.*, 2005; Wen *et al.*, 2012). Predomina en el Estado de Veracruz, entre altitudes de 0 a 500 m y donde prevalecen condiciones climáticas del trópico húmedo (Wellhausen *et al.*, 1951).

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 los Valles Altos (Castillo, 1993). Sin embargo, se tienen 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 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 procesar maíces con un índice de flotación (IF) ≤ 20 %, pedicelo ≤ 2 %, pericarpio entre 4.5-5.5 % y germen ≤ 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 ≥ 74 kg hL⁻¹ (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 (> 2200 msnm), la variedad V-520C representativa de la raza Tuxpeño de origen tropical fue sometida a 14 y 19 ciclos de Selección Masal Visual (SMV) para su adaptación. El criterio de selección fue el rendimiento y el buen aspecto de plantas y mazorcas, por lo que se consideró conveniente evaluar el rendimiento de los ciclos avanzados de selección 14 y 19, junto con el material original. No obstante, el buen rendimiento de las variedades adaptadas, es necesario conocer la calidad del grano para determinar cuál de las tres poblaciones cumple con las especificaciones demandadas por las industrias de la masa-tortilla y/o la de harina nixtamalizada. El objetivo de la presente investigación fue determinar la interacción genotipo x 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, México), como en su clima adaptado (Edo. México). Esto con la finalidad de conocer su potencial de rendimiento y de calidad de grano para las industrias procesadoras de la masa-tortilla y/o harina nixtamalizada.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Material evaluado

El germoplasma utilizado consistió de una población de maíz de la raza Tuxpeño denominada ‘V-520C’ ciclo cero (‘C0’), así como los genotipos sometidos a 14 (‘C14’) y 19 (‘C19’) ciclos de selección, obtenidos por SMV. La adaptación del maíz Tuxpeño se realizó recurrentemente durante 14 y 19 años (‘C14’ y ‘C19’, respectivamente) mediante la SMV propuesta por Molina (1983). El criterio de selección fue el rendimiento de grano junto con el aspecto de planta y mazorca (grandes, cilíndricas, sanas con hileras rectas). La selección para adaptación se llevó a cabo en el Campo Experimental del Colegio de Postgraduado, 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

La variedad original ‘V-520C’ de la raza Tuxpeño ‘C0’, así como sus ciclos de SMV ‘C14’ y ‘C19’, fueron evaluados durante los años 2013 y 2014 en las localidades de Montecillo y Coatlinchán, municipio de Texcoco, Estado de México, ambas pertenecientes a los Valles Altos Centrales de México; en Montecillo se hicieron dos ensayos y en Coatlinchán uno. En los mismos años se establecieron tres experimentos en la localidad Tepetates del municipio de Manlio Fabio Altamirano, Estado de Veracruz, correspondiente a la Vertiente del Golfo. El manejo agronómico y las características generales edafoclimáticas de las localidades se describen en el Cuadro 1.1. El diseño utilizado fue bloques completos al azar con tres repeticiones (Martínez, 1988), 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, dando una densidad de población de 50 mil plantas por hectárea.

Manejo agronómico

En Montecillo se utilizó la fórmula de fertilización 140-60 (Kg ha⁻¹ de N-P), mientras que en Coatlinchán fue la 140-40 (Cuadro 1.1); 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. En Tepetates se establecieron los ensayos en los ciclos: PV de los años 2013 y 2014 (temporal) y el OI (2014) donde se aplicaron 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.

Cuadro 1.1. Características del manejo agronómico y condiciones ambientales de las localidades de evaluación.

Localidad, año-ciclo*	Ubicación		Altitud (m)	Fecha Siembra/cosecha	Fertilización kg ha ⁻¹ de N-P	Tipo de suelo	Precipitación [†] (mm)	T (°C) ^{††}	
	Estado	Mpio [‡]						Max	Min
Montecillo, 2013-PV	MÉX.	Tex	2250	21-05/21-11	140-60	Vertisol	1277 ^a	29.0	6.0
Montecillo, 2014-PV	MÉX.	Tex	2250	05-06/04-12	140-60	Vertisol	1179 ^a	29.0	3.0
Coatlinchán, 2014-PV	MÉX.	Tex	2300	09-05/20-11	140-40	Phaeozem	1306 ^b	30.0	6.0
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 ^c	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; † Precipitación total acumulada (del periodo siembra/cosecha); ^a, ^b, ^c = riego inicial + tres riegos auxiliares, riego inicial, diez riegos auxiliares, respectivamente; †† Max = temperatura máxima; Min = temperatura mínima (durante el periodo siembra/cosecha).

VARIABLES EVALUADAS

El rendimiento y las características físicas del grano se obtuvieron de acuerdo con lo descrito por Vázquez *et al.* (2012; 2015). El rendimiento (REN) se expresó en t ha⁻¹. 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 peso hectolítrico (PH)

(método 84-10; AACC, 2000). Los porcentajes de pico (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 para Windows, versión 9.0 (SAS Institute, 2002). Este modelo generó una gráfica biplot por cada variable con su respectivo primer Componente Principal (CP1).

1.5 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 x ambiente (IG*A) para todas las variables evaluadas (Cuadro 1.2).

Cuadro 1.2. Cuadrados medios y nivel de significancia mediante el modelo AMMI de seis variables de maíces Tuxpeños: ‘C0’, ‘C14’ y ‘C19’ evaluados en los Estados de Veracruz y México (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**	147.50**	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 _i)	6	78.08	63.53	92.61	72.00	74.99	86.08
CP2 (P _i)	4	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
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_i = Porcentaje acumulado; CV = Coeficiente de variación; \bar{X} = Promedio de la variable; GL = Grados de libertad; REN = Rendimiento; IF = Índice de flotación; PH = Peso hectolítrico; PIG = Pico 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; igualmente, el

CP1 fue altamente significativo, el cual se formó por la suma de cuadrados de la IG*A, que explicó el 78.08 % de la variabilidad. Sin embargo, el CP2 no fue significativo y solo representó el 21.92 %, ambos componentes explicaron el 100 % de la variabilidad (Cuadro 1.2).

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 central, 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 1.1A 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⁻¹, 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⁻¹ (superando a la media nacional), que representa un aumento del 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, que a pesar de haber sido evaluado tanto en clima tropical (origen) como en templado (adaptado), superó a los ciclos inferiores 0 y 14, lo cual se reflejó en el rendimiento de grano. Al respecto, Pérez *et al.* (2000; 2007) encontraron resultados similares en variedades de la raza Tuxpeño, donde los

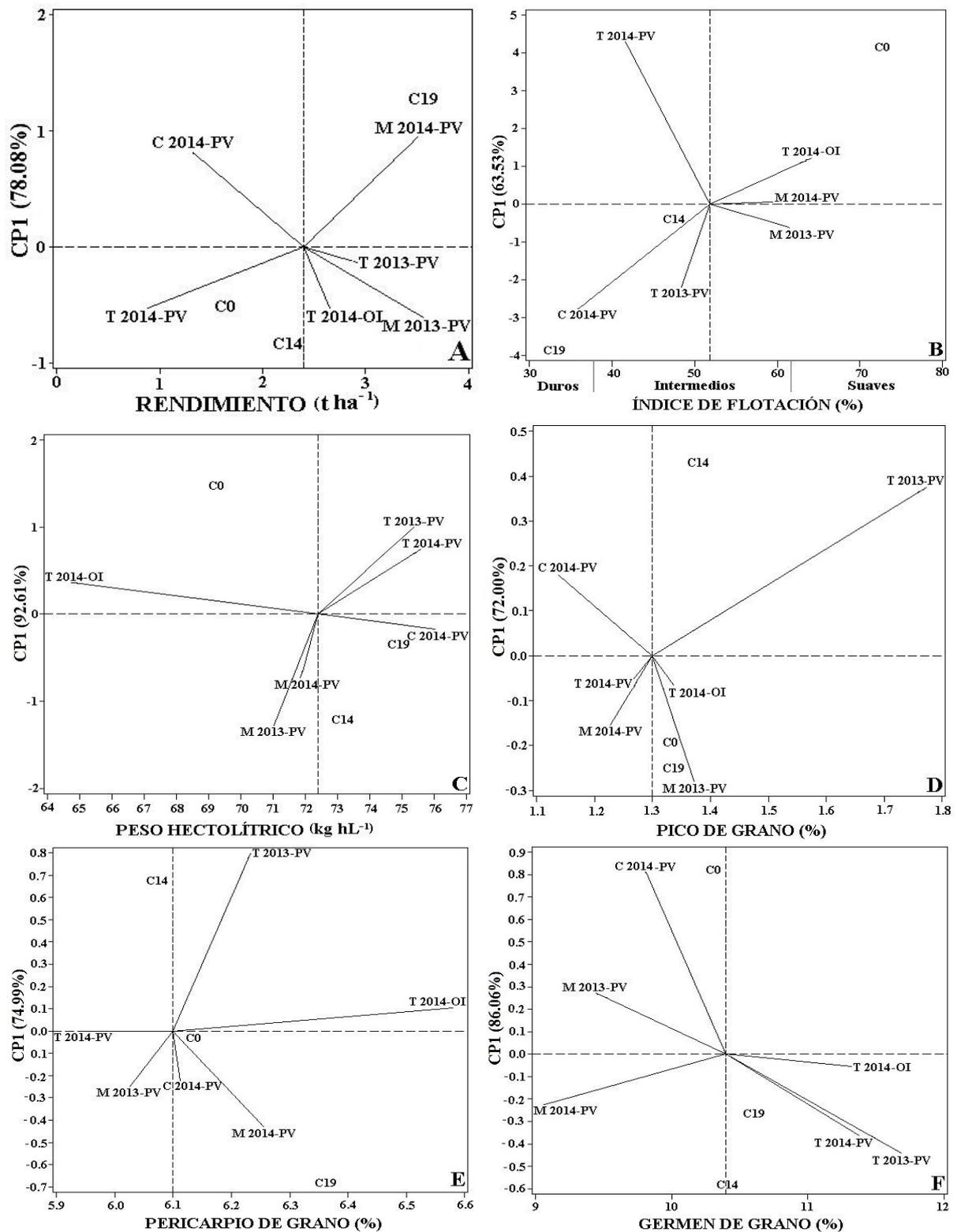
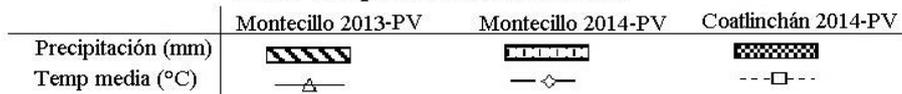
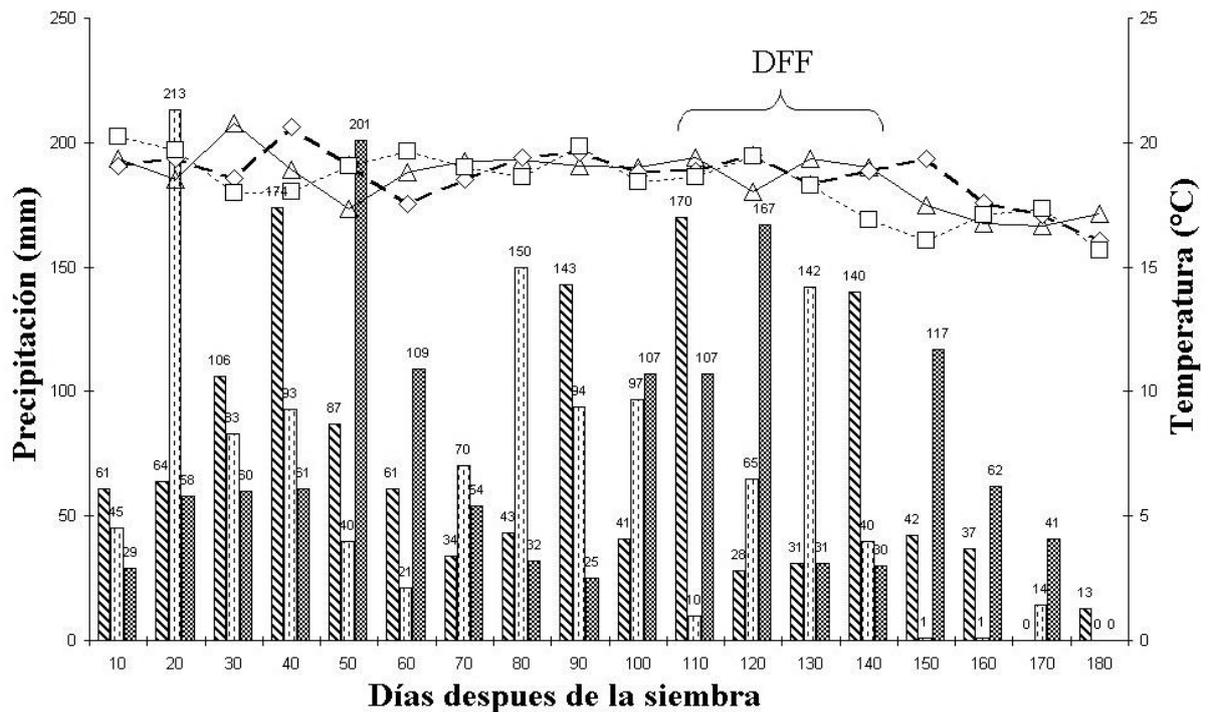


Figura 1.1. Promedios de rendimiento de grano (A), índice de flotación (B), peso hectolítrico (C), pico de grano (D), pericarpio de grano (E), germen de grano (F) y coeficientes del CP1 para la interacción genotipo x ambiente de maíces Tuxpeños: ‘C0’, ‘C14’ y ‘C19’ de SMV en los Estados de Veracruz y México, 2013-2014.

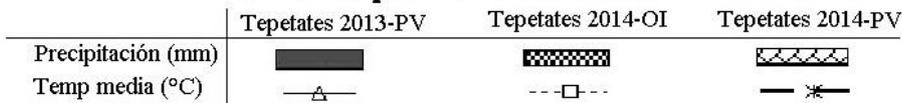
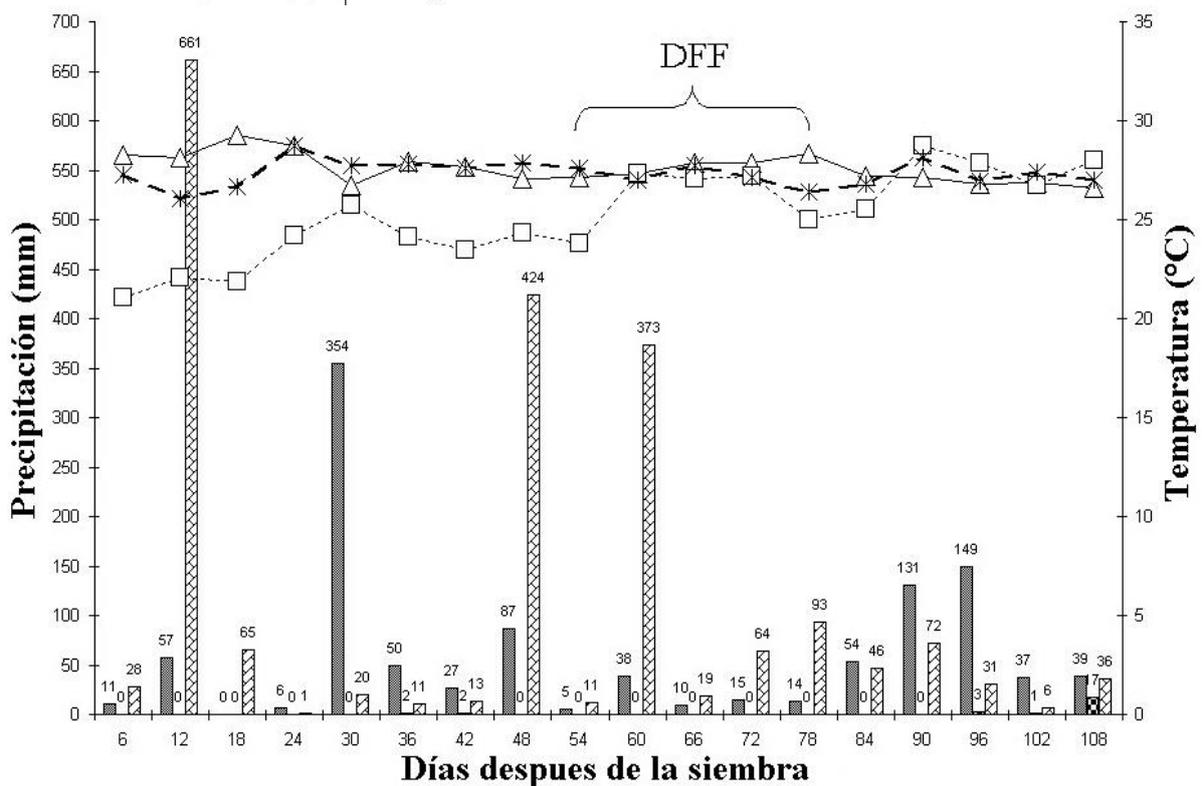
ciclos más avanzados en SMV fueron de mayor rendimiento que los ciclos inferiores.

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 1.1A). De acuerdo con la longitud de los vectores, los ambientes que mejor discriminaron a los genotipos ‘C0’ y ‘C14’ fueron M 2014-PV, seguido por M 2013-PV y Coatlinchán (C 2014-PV); en cambio, la localidad de Tepetates, en sus tres evaluaciones: T 2013-PV, T 2014-OI, T 2014-PV, no discriminaron a estos mismos genotipos, debido a que no fue el ambiente de selección, pero es el lugar de origen del maíz Tuxpeño. Los dos ambientes de Montecillo (2013-PV y 2014-PV) tuvieron un rendimiento promedio igual al del genotipo ‘C19’ (3.5 t ha⁻¹), seguido por los ambientes T 2013-PV y T 2014-OI (los más estables), pero con un rendimiento promedio de 2.9 y 2.6 t ha⁻¹, respectivamente. Por último, los ambientes con el menor rendimiento fueron: C 2014-PV y T 2014-PV, con 1.3 y 0.8 t ha⁻¹, respectivamente.

Los altos rendimientos observados en M 2013-PV y M 2014-PV se explican porque Montecillo fue el ambiente de selección, además, esta localidad tuvo una 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 1.2A); se fertilizó con una mayor dosis de N y P, y los suelos tienen un alto contenido de arcilla (Cuadro 1.1). 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. El rendimiento bajo en T 2014-PV estuvo influenciado por un exceso de agua mal distribuida durante todo el desarrollo de la planta (Cuadro 1.1 y Figura 1.2B). De la misma manera, el ambiente de C 2014-PV pudo estar influenciado por un suelo de poca profundidad (Phaeozem) y pobre en P (Cuadro 1.1); aunado a esto, se tuvo una mala distribución de la precipitación, ya que poco antes de los



A



B

Figura 1.2. Relaciones termopluviométricas de tres localidades, por municipio: (A) Texcoco, México; (B) Manlio Fabio Altamirano, Veracruz (2013-2014).

DFF hubo un déficit hídrico notable (Figura 1.2A). Los sitios T 2013-PV y T 2014-OI tuvieron rendimientos cercanos, de 2.9 y 2.6 t ha⁻¹, respectivamente, ligeramente arriba de la media (Figura 1.1A). La localidad T 2013-PV mostró mayor rendimiento que su homólogo T2014-PV, lo que se atribuye a un mayor volumen de lluvia durante los días de floración femenina en 2013 (Figura 1.2B); sin embargo, la precipitación estuvo mal distribuida, lo que provocó dos déficit: uno antes y otro durante los DFF, lo que pudo afectar el periodo de llenado de grano y reducir el rendimiento, como lo indican Tanaka y Yamaguchi (1972). Una situación similar se presentó en T 2014-OI, donde las temperaturas fueron altas y hubo poca precipitación y riego, lo que causó estrés hídrico durante todo el desarrollo de la planta (Figura 1.2B). 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 1.1).

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 1.2).

Para el IF, las tres fuentes de variación (A, G, e IG*A) fueron altamente significativas ($P \leq 0.01$), al igual que el CP1, que representó el 63.52 % de la variabilidad IG*A (Cuadro 1.2). El genotipo más estable por la dureza de sus granos (IF) fue el 'C14', y los más inestables fueron 'C0' y 'C19'; las localidades de mayor estabilidad (baja IG*A) fueron: M 2013-PV y M 2014-PV, que también fueron las de mayor rendimiento (Figura 1.1B). 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 la escala de Salinas y Vázquez (2006) para IF, las mazorcas de 'C0' tuvieron granos de endospermo suave (72 %), los granos del C14 fueron de endospermo intermedio (49 %) y los granos del 'C19' fueron de endospermo duro (33 %). La IG*A, mostró que únicamente en C 2014-PV se obtuvieron granos de textura dura (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 (38-62 %), quedando únicamente los granos de T 2014-OI como suaves (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 72 %) cambió a grano duros ('C19' con 33 %), es decir se redujo en un 54.2 % el IF. 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 V-520C ('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 1.1B).

En el PH el CP1 explicó el 92.62 % de la IG*A (Cuadro 1.2). 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^{-1}), mientras que los genotipos 'C14' y 'C0' tuvieron valores de 73.5 y 69.2 kg hL^{-1} respectivamente, siendo inestables entre ambientes (Figura 1.1C); el genotipo 'C0' fue el más inestable 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 más altos para PH (76.0 kg hL^{-1}), en tanto que en T 2014-OI se registró la media general más baja (64.6 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 1.2B), y sus condiciones edafoclimáticas (baja fertilización y temperaturas mínimas extremas) no fueron tan favorables (Cuadro 1.1). El ambiente con menor PH fue T 2014-OI, lo que se atribuye 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 le considera adecuado para la IMT e IHN. Se observó una correlación significativa entre PH e IF ($r = -0.72^{**}$), 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 el 72.00 % de su variabilidad (Cuadro 1.2). De acuerdo con la Figura 1.1D, el genotipo más estable para PIG fue ‘C0’, el cual tuvo un promedio bajo (1.33 %), seguido por el ‘C19’ (1.34 %), y en último lugar, pero con una media general mayor, estuvo ‘C14’ (1.37 %). El ‘C14’ que tuvo mayor PIG, también tuvo una 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 % (el más alto), seguida por M 2013-PV (1.37 %) y C 2014-PV, con una media general de 1.13 % (el 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 los de Salinas *et al.* (2010), quienes evaluaron materiales híbridos tropicales en el Estado de Veracruz, cuyos porcentajes

estuvieron entre 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 de 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’ fue estable a través de los ambientes de estudio, todos los genotipos tuvieron valores de PIG menores al 2%, el cual es demandado como máximo por la IHN.

El porcentaje de pericarpio de grano (PEG) fue significativo ($P \leq 0.01$) en G, A, IG*A, y en los cuadrados medios de los CP1 y CP2, que explicaron el 74.99 % y 25.01 % de la variación, respectivamente (Cuadro 1.2). La Figura 1.1E 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’, seguido por ‘C19’, y el menos estable fue ‘C14’; es decir, el que tuvo mayor IG*A. Así, el genotipo ‘C14’ fue el más inestable y de 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. Fue T 2014-PV el ambiente más estable para PEG y donde se produjeron los granos con menor porcentaje (5.93 %). En T 2014-OI se observó un comportamiento inverso, la menor estabilidad y el mayor porcentaje de PEG (6.58 %). 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 %. 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. 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 1.2). Se observó una marcada división entre las

localidades del Estado de México y Veracruz, quedando los genotipos en medio de tal división (Figura 1.2F). 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 T 2013-PV y C 2014-PV se observó la mayor discriminación entre genotipos para GEG. Por otra parte, el ambiente más estable en cuanto a la IG*A fue T 2014-OI, seguido por M 2014-PV y M 2013-PV. Los genotipos producidos en los Valles Altos tuvieron menor porcentaje de GEG: M 2014-PV (9.06 %, la más baja), M 2013-PV (9.44 %) y C 2014-PV (9.81 %), mientras que las localidades de Veracruz tuvieron medias más elevadas: T 2014-OI (11.31 %), T 2014-PV (11.37 %) y T 2013-PV (11.68 %, la más alta). Las tres localidades con menos GEG tuvieron una buena distribución de la precipitación, lo contrario sucedió con las tres evaluaciones de Tepetates (Cuadro 1.1 y Figura 1.2B). Los porcentajes de GEG y de PIG estuvieron correlacionados significativamente ($r = 0.51^{**}$). Zepeda *et al.* (2009) reportan porcentajes de GEG entre 8.7 a 11.0 en maíces híbridos evaluados en Valles Altos; en tanto que Salinas *et al.* (2010) encontraron porcentajes entre 12.4 a 13.3, en el Estado de Veracruz, lo cual expone una tendencia semejante a la del presente estudio. Al margen de los ambientes, el rendimiento, PH, PEG y el GEG de los genotipos se incrementaron paralelamente con el avance de la SMV para adaptación, mientras que el IF disminuyó y el PIG se mantuvo. Los resultados para germen en los tres ambientes de Tepetates coincidieron con los obtenidos por Salinas *et al.* (2013) para variedades de la raza Tuxpeño; esto pudo ser porque en ambos casos los genotipos de Tuxpeño fueron evaluados en zonas tropicales. Para el porcentaje de germen del grano (GEG), todos los genotipos, en todas las localidades cumplieron con los requisitos de la IHN ($\leq 12\%$).

1.6 CONCLUSIONES

Las condiciones agroclimáticas de Montecillo Estado de México, resultaron favorables para el mejoramiento de la productividad y de la calidad industrial del maíz Tuxpeño V-520C con 19

ciclos de Selección Masal Visual ('C19'). Respecto al 'C0' su rendimiento se incrementó 45.7 % y el índice de flotación se redujo 54.2%, además fue el más estable para peso hectolítrico y porcentaje de germen de grano, rendimiento de grano con 3.5 t ha⁻¹, índice de flotación de 33 %, correspondiente a granos duros, peso hectolítrico de 74.8 kg hL⁻¹, 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 la Selección Masal Visual en el genotipo 'C19' del maíz Tuxpeño adaptado en los Valles Altos de México, contribuyó a aumentar la productividad y disponer de un grano con calidad para la industria local de la masa y la tortilla.

1.7 LITERATURA CITADA

American Association of Cereal Chemists (AACC). 2000. Approved Methods of the AACC. 16th Ed. AACC. The Association. St. Paul, MN. USA. 1200 p.

Aragón, C. F.; Taba, S.; Hernández, C. J. M.; Figueroa, C. J. de D. y Serrano, A. V. 2006. Actualización sobre maíces criollos de Oaxaca. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Informe final SNIB. CONABIO proyecto Núm. CS002, México D.F. 119 p.

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. Libro Técnico No. 15. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Oaxaca, México. 249 p.

Arellano, V. J. L.; Rojas, M. I.; Gutiérrez, H. G. F. 2013. Híbridos y variedades sintéticas de maíz azul para el Altiplano Central de México: potencial agronómico y estabilidad del rendimiento. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 4(7): 999-1011.

- Arellano, V. J. L.; Rojas, M. I.; Gutiérrez, H. G. F. 2014. Variedades de maíz azul Chalqueño seleccionadas por múltiples caracteres y estabilidad del rendimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5(8): 1469-1480.
- Barrales, D. S.; Muñoz, O. A. y Sotres, R. D. 1984. Relaciones termoplumiométricas en familias de maíz bajo condiciones de temporal. *Agrociencia*. 58: 127-139.
- Bellon, M. R.; Barrientos, P. A. F.; Colunga, G. P.; Perales, H.; Reyes, A. J. A.; Rosales, S. R. y Zizumbo, V. D. 2009. Diversidad y conservación de recursos genéticos en plantas cultivadas. In: *Capital natural de México, Volumen II: Estado de conservación y tendencias de cambio*. CONABIO, México. pp. 355-382.
- Bellón, 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 (número especial)* 44: 69-79.
- Crossa, J. 1990. Statistical analysis of multilocation trials. *Advances in agronomy*. 44: 55-85.
- Fasahat, P.; Muhammad, K.; Abdullah, A.; Rahman, B. M. A.; Siing, N. M.; Gauch, J. H. G. and Ratnam, W. 2014. Genotype \times environment assessment for grain quality traits in rice. *Communications in biometry and crop science*. 9(2): 71-82.
- Figuroa, 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. *Archivo Latinoamericano de Nutrición*. 51(3): 293-302.
- García, E. 1973. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Instituto de Geografía (2ª edición). Universidad Nacional Autónoma de México. D. F., México. 246 p.
- 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. de 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. *Agricultura Técnica en México*. 35(2): 189-200.
- Hristov, N.; Mladenov, N.; Djuric, V.; Kondic, S. A.; Marjanovic, J. A. and Simic, D. 2009. Genotype by environment interactions in wheat quality breeding programs in southeast Europe. *Euphytica*. 174: 315-324.
- Kato, Y. T. A.; Mapes, S. C.; Mera, O. L. M.; Serratos, H. J. A. y Bye, B. R. A. 2009. Origen y Diversificación del Maíz, una Revisión Analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. D.F., México. 116 p.
- 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. Publicación Especial. Centro de Genética, Colegio de Postgraduados. Chapingo, Edo 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.
- Pérez, C. 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. *Fitotecnia Mexicana*. 25(4): 435-441.
- Pérez, C. A.; Molina, G. J. D.; Martínez, G. A.; García, M. P.; 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. *Botánica Experimental*. 75: 31-40.

Salinas, M. Y. y Vázquez, C. G. 2006. Metodologías de Análisis de la Calidad Nixtamalero-Tortillera en Maíz. Folleto Técnico No. 23. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valle de México. Chapingo, Edo de México. 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. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 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. *Fitotecnia Mexicana*. 36(1): 23-31.

Secretaría de Economía (SE). 2002. Norma Mexicana para Maíces Destinados al Proceso de Nixtamalización, NMX-FF-034 (Parte 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. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Dirección General de Normas. México, D. F. 18 p.

Statistical Analysis System (SAS). 2002. The SAS System for Windows 9.0. User's guide. Cary, N. C. USA. 584 p.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2013. 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. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/> (Abril 2015).

Tanaka, A. and Yamaguchi, J. 1972. Dry matter production, yield components and grain yield of the maize plant. *Journal of the Faculty of Agriculture*. 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. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 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. *Fitotecnia Mexicana*. 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. *Fitotecnia Mexicana*. 38(1): 75-83.

Wellhausen, J. E.; Roberts, M. L. y Hernández, X. E. en colaboración con Mangelsdorf, P. C. 1951. Razas de maíz de México, su origen, características y distribución. *Xolocotzia*. Tomo II. *Revista de Geografía Agrícola*. pp. 609-732.

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. *Agronomy Journal*. 80(3): 388-393.

CAPÍTULO II

RENDIMIENTO Y CAMBIOS ADAPTATIVOS MORFOLÓGICOS EN MAÍZ TUXPEÑO ADAPTADO A VALLES ALTOS MEDIANTE SELECCIÓN MASAL

2.1 RESUMEN

En México, la Selección Masal Visual (SMV) es un método efectivo para adaptar las razas tropicales y subtropicales de maíz (*Zea mays* L.) a otros ambientes. La raza Tuxpeño (V-520C) es originaria de Veracruz, tal raza fue sometida a SMV durante 14 (C14) y 19 (C19) ciclos en Valles Altos, seleccionando plantas rendidoras y sanas. Se evaluó la variedad original V-520C de la raza Tuxpeño (C0), así como C14, C19 y el Compuesto Universal de la raza Chalqueño (CU) como testigo, en Valles Altos y en Veracruz. El objetivo fue medir el rendimiento de grano y estudiar los cambios adaptativos morfológicos de la planta y mazorca. Se realizaron tres experimentos en cada zona entre los años 2013 y 2014, utilizando un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se registró el rendimiento de grano, caracteres agronómicos, de espiga y componentes del rendimiento. Se realizó un análisis de varianza combinado de localidades sin CU, e individuales de Veracruz sin CU, y de Valles Altos con CU, con sus respectivas pruebas de medias Tukey. Los resultados indican cambios adaptativos significativos por efecto de la SMV en al menos un análisis de varianza de los tres, para las fuentes de ambientes, genotipos y la interacción genotipo x ambiente en el rendimiento de grano, caracteres morfológicos de planta y mazorca. El C19 registró los mayores cambios de adaptación favorables por la SMV, fue el de mayor rendimiento en el análisis combinado (3.5 t ha^{-1}) y de Veracruz (2.6 t ha^{-1}), además redujo los días a la floración, la altura de planta, el número de hojas totales y los tamaños de espiga, e incrementó el número de ramas primarias de la espiga y los componentes de rendimiento.

Palabras clave: *Zea mays* L., caracteres agronómicos, caracteres de espiga, componentes de rendimiento, raza Chalqueño.

YIELD AND ADAPTIVE MORPHOLOGICAL CHANGES IN TUXPEÑO MAIZE ADAPTED TO HIGH VALLEYS THROUGH MASS SELECTION

2.2 ABSTRACT

In Mexico, Visual Mass Selection (VMS) is an effective method to adapt tropical and subtropical maize (*Zea mays* L.) races to other environments. The race named Tuxpeño (V-520C), originally from Veracruz, was previously subjected to VMS during 14 (C14) and 19 (C19) cycles on High Valleys, selecting high-yielding and healthy plants. It was evaluated the original variety V-520C of the race Tuxpeño (C0), as well as C14, C19 and the variety Universal Composite of the Chalqueño race as a check, under different environments of High Valleys and Veracruz. The objective of this work was to measure the grain yield and to study the morphological adaptive changes regarding to plant and ear. Three experiments were carried out for each zone during 2013 and 2014, using a randomized complete block design with three replications. Grain yield, its components, agronomic and tassel traits were scored. A combined analysis of environments was conducted and individual ones for Veracruz without CU and High Valleys with CU, in addition, the Tukey's test was performed. The results indicated significant adaptation changes due to VMS at least for one analysis of variance for sources of variation environments, genotypes and the genotype-environment interaction for grain yield and morphological characters related to plant and ear. The C19 recorded the highest adaptation changes by VMS and exhibited the highest yield in the combined analysis (3.5 t ha⁻¹) and in that for Veracruz (2.6 t ha⁻¹), in addition, C19 showed a reduction in days to flowering, plant height, number of total leaves and tassel size, and an increment was observed on the number of primary branches of tassel and the yield components (traits of ear).

Key words: *Zea mays* L., agronomic traits, tassel traits, yield components, race chalqueño.

2.3 INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es el cereal cultivado más importante del mundo, ya que sobrepasa en producción de grano al trigo (*Triticum aestivum* L.) y al arroz (*Oryza sativa* L.), y únicamente es superado por la producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en tallo (FAOSTAT, 2016). En México y muchos países del mundo, el maíz es el componente básico de la dieta humana y animal, y materia prima muy importante para la industria (OCDE/FAO, 2014).

México es considerado como el centro de origen, domesticación y diversificación del maíz, por lo que en el territorio nacional se cuenta con una gran diversidad genética y de usos y costumbres de este cultivo (Kato *et al.*, 2009), el cual tiene un rendimiento promedio nacional de 3.3 t ha⁻¹ de grano (SIAP, 2014).

Castillo (1993) señala que la diversidad de maíz en México ha sido poco utilizada en programas de mejoramiento genético para la obtención de variedades e híbridos, por lo que el mejoramiento se ha limitado a usar pocas razas localmente adaptadas, como la raza Tuxpeño en el trópico húmedo, Celaya y Cónico Norteño en el Bajío, y Chalqueño y Cónico en los Valles Altos. Este bajo porcentaje de razas usadas se debe a que la mayoría de estas presentan problemas de adaptación cuando se siembran fuera de su ambiente (Holley y Goodman, 1988), por lo que para mejorar su adaptación a otros lugares requieren de un proceso de selección (Goodman, 2002). Al respecto, existen evidencias de germoplasma de maíz tropical y subtropical adaptado a climas templados mediante Selección Masal Visual (SMV) (Pérez *et al.*, 2002; 2007). Específicamente, la raza Tuxpeño se pudo adaptar a Valles Altos de México con este método (>2200 msnm) (De Jesús *et al.*, 1990; Pérez *et al.*, 2000).

La raza Tuxpeño se distingue por su alto rendimiento y calidad de grano, buen vigor, cierta tolerancia a la sequía, y resistencia a plagas y enfermedades (Bellón *et al.*, 2005; Wen *et al.*,

2012). Esta raza predomina en el Estado de Veracruz, entre altitudes de 0 a 500 m y donde prevalece el clima de trópico húmedo (Wellhausen *et al.*, 1951).

Las razas tropicales y subtropicales de maíz son difíciles de adaptar en ambientes más templados y con mayor altitud si no se cuenta con una metodología adecuada. La SMV ha probado ser una alternativa para este fin, ya que a través de varios ciclos de selección las variedades exóticas seleccionadas presentan características similares o superiores a las variedades locales, por lo que el germoplasma exótico adaptado podría generar un incremento en la diversidad genética del maíz local (Pérez *et al.*, 2000; 2002; 2007).

La variedad V-520C de la raza Tuxpeño fue sometida a 14 y 19 ciclos de SMV en Valles Altos de México para su adaptación con base en el criterio de seleccionar plantas rendidoras y sanas. En este trabajo se evaluó, tanto en Veracruz (clima cálido subhúmedo) como en el Estado de México (clima templado subhúmedo), los ciclos 14 y 19 de la variedad V-520C obtenidos por SMV, junto con el material original y la variedad Compuesto Universal de la raza Chalqueño, esto con la finalidad de medir el rendimiento del maíz Tuxpeño seleccionado y estudiar algunos cambios adaptativos morfológicos de la planta y mazorca.

Se postula que la selección de las plantas más sanas y rendidoras aumenta la frecuencia de genes favorables para rendimiento y adaptación, pero también que la selección de los genotipos más aptos causa cambios adaptativos morfológicos en planta y mazorca, por ello el objetivo del presente trabajo fue evaluar el rendimiento y sus componentes y estudiar los cambios adaptativos morfológicos en plantas y mazorcas de la variedad V-520C de la raza Tuxpeño ciclos 0, 14 y 19, utilizando la SMV en Valles Altos, así como un testigo de la raza Chalqueño. Se plantea la hipótesis de que la SMV ha sido efectiva para adaptar el maíz Tuxpeño de zona tropical a condiciones de Valles Altos. En este sentido, el ciclo de selección más avanzado tendrá mayor rendimiento y contará con los caracteres morfológicos de planta y mazorca que expresarán cambios de adaptación a clima templado por efecto de la selección.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético evaluado

La variedad de maíz V-520C ciclo cero (C0) de la raza Tuxpeño fue sometida a SMV en el Estado de México durante varios años, obteniéndose los compuestos de ciclos de selección C14 y C19 (refiriéndose a los ciclos con SMV). La selección se hizo visualmente, basándose en aspectos de la mazorca (grande, cilíndrica, sana, con hileras rectas y grano blanco dentado) y de la planta (sana, vigorosa, sin acame, típica de Tuxpeño, etc.) de acuerdo con lo descrito por Molina (1983). La SMV se llevó a cabo en el Campo Agrícola Experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, ubicado en Texcoco, con clima templado subhúmedo (García, 1973) y una altitud de 2250 m. El material también incluyó la variedad de polinización libre Compuesto Universal SM12 (CU) de la raza Chalqueño como testigo.

Ubicación de los experimentos

El compuesto de ciclo original C0 de V-520C, sus compuestos de ciclos C14 y C19 de SMV y el testigo CU se evaluaron en 2013 y 2014 en Montecillo y en 2014 en Coatlinchán, ambas localidades del municipio de Texcoco, Estado de México, con condiciones ambientales de Valles Altos. También en 2013 y 2014 se establecieron tres experimentos en el predio de Tepetates del municipio de Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, por lo que en total se tuvieron seis ambientes. Para la evaluación de los materiales se usó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, donde la unidad experimental estuvo formada por dos surcos de 6 m de longitud, separados a 80 cm, sembrándose dos semillas cada 50 cm, lo que dio un total de 52 plantas por parcela, equivalente a una densidad de siembra de 50 mil plantas por hectárea. El manejo agronómico, las características edafoclimáticas, y la ubicación de las localidades se describen en el Cuadro 2.1 y la Figura 2.1.

Cuadro 2.1. Características edafoclimáticas de las seis localidades de evaluación de los maíces Tuxpeños: C0, C14, C19, y CU de los Estados de Veracruz y México.

Localidad, año-ciclo [†]	Abreviado de localidad	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	M 2013-PV	2250	21-05/21-11	140-60	Vertisol pH 7.5	1277 ^a	29.0 6.0
Montecillo, 2014-PV	M 2014-PV	2250	05-06/04-12	140-60	Vertisol pH 7.5	1179 ^a	29.0 3.0
Coatlinchán, 2014-PV	C 2014-PV	2300	09-05/20-11	140-40	Phaeozem pH 6.2	1306 ^b	30.0 6.0
Tepetates, 2013-PV	T 2013-PV	20	24-05/23-09	110-46	Vertisol pH 6.3	1227	35.9 21.2
Tepetates, 2014-OI	T 2014-OI	20	28-01/16-05	110-46	Vertisol pH 6.3	26 ^c	42.2 10.6
Tepetates, 2014-PV	T 2014-PV	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; [¶] = Precipitación total acumulada (del periodo siembra/cosecha); [§] = temperatura máxima, ^P = temperatura mínima (durante el periodo siembra/cosecha), respectivamente; ^a, ^b, ^c = riego inicial + tres riegos auxiliares, riego inicial, diez riegos auxiliares, respectivamente.

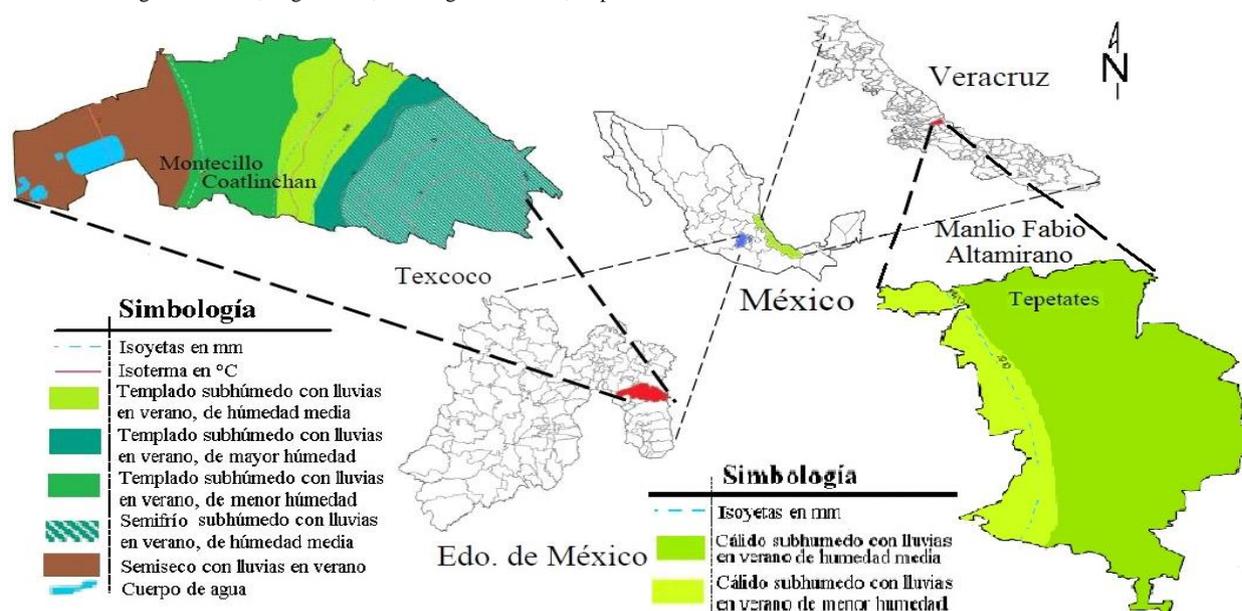


Figura 2.1. Localización de los municipios y localidades donde se realizaron los experimentos con su tipo de clima.

Fertilización y manejo de los ensayos

La fórmula de fertilización empleada en los dos ciclos de evaluación en Montecillo (M 2013-PV y M 2014-PV) fue 140-60-00 (kg ha⁻¹ de N-P-K), mientras que en Coatlinchán (C 2014-PV) se utilizó la fórmula 140-40-00 (Cuadro 2.1). Al momento de la siembra se aplicó todo el fósforo y la mitad del nitrógeno; la otra mitad de nitrógeno se aplicó a los 35 días después de la siembra. En las dos localidades se aplicó un riego inicial de germinación y se dieron riegos de auxilio cuando fue necesario. Por otro lado, en los tres ciclos de Tepetates (T 2013-PV, T 2014-OI y T 2014-PV) se fertilizó con la fórmula 110-46-00, aplicándose 64-18-00 al momento de la siembra y el resto a los 30 días después de la siembra. En el predio de

Tepetates se aplicó riego cada 10 días sólo al ensayo establecido en el ciclo OI, desde la siembra hasta el llenado de grano, ya que los ensayos establecidos en los ciclos PV en los años 2013 y 2014 fueron de temporal. Para el control de maleza en todos los ciclos de evaluación, tanto en el Edo. de México como en Veracruz, se aplicó herbicida con los ingredientes activos dicamba, atrazina, terbutrina, paracuat y nicosulfurón. Las dosis utilizadas fueron las recomendadas en cada producto para el cultivo de maíz en las regiones respectivas.

Variables evaluadas

El rendimiento (REN) se obtuvo mediante el peso de mazorca por parcela, para lo cual se pesó la materia seca del grano ajustado a 14 % de humedad y expresado en $t\ ha^{-1}$, donde se multiplica la proporción de grano de la mazorca por un factor que extrapola a la superficie de una hectárea (Vázquez *et al.*, 2012; Vázquez-Carrillo *et al.*, 2015). También en cada parcela experimental se registraron los promedios de 10 plantas con competencia completa o de 10 mazorcas representativas para medir caracteres agronómicos, de espiga, y componentes del rendimiento, respectivamente (Pérez *et al.*, 2000; Rocandio-Rodríguez *et al.*, 2014). Los caracteres agronómicos evaluados fueron: días a floración masculina (DFM) y femenina (DFF), como el número de días transcurridos desde la siembra hasta que el 50 % de las plantas de la parcela presentaron anthesis y estigmas expuestos en el jilote superior, respectivamente; también se midieron en cm la altura de planta (APL) y la altura de inserción de la mazorca superior (AMZ), y se contó el número de hojas totales (NHT) y arriba de la mazorca superior (NHA). En la espiga se midió en cm la longitud total (LTE), la longitud del segmento ramificado (LSR), y la longitud de la rama central (LRC), estas desde el pedúnculo, inicio de ramificación e inicio de la rama central, respectivamente, hasta el ápice de la rama central, así mismo, se contó el número de ramas primarias (NRP) y secundarias (NRS). Los componentes del rendimiento medidos en 10 mazorcas de cada parcela fueron: longitud

(LMZ) y diámetro (DMZ) en cm, número de hileras (NHM) y número de granos por hilera (NGH), así como, el peso en gramos de 100 granos (PCG) y el peso volumétrico de 200 mL de grano (PVM).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza combinado con datos de los seis ambientes de evaluación (Cuadro 2.1) sin considerar a la variedad CU, ya que este material genético no se desarrolló de manera satisfactoria en las tres evaluaciones de Tepetates por estar completamente desadaptado a las condiciones de clima cálido subhúmedo. Para el análisis de varianza de los tres ciclos agrícolas en las localidades de Valles Altos sí se incluyó al CU, ya que este material está localmente adaptado en esta zona. En un tercer análisis de varianza solo se incluyeron los tres ciclos agrícolas de evaluación del estado de Veracruz, donde se analizaron los datos de los tres materiales Tuxpeños. Por último, se realizaron comparaciones de medias Tukey ($\alpha=0.05$) entre los materiales genéticos de los tres análisis de varianza obtenidos con el programa estadístico SAS (SAS Institute, 2002).

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó un análisis de varianza combinado utilizando los seis ambientes totales y otro con los tres ambientes de Veracruz, en los que no se incluyó la variedad CU de Chalqueño, (Cuadro 2.2), donde hubo significancia muy similar entre las fuentes de variación: ambientes y genotipos para las variables de rendimiento (REN), días a floración masculina y femenina (DFM y DFF), los portes de planta y las inserciones a la mazorca (APL y AMZ), número de hojas totales y arriba de la mazorca (NHT y NHA), así como para las características de espiga en general, exceptuando número de ramas secundarias (NRS), y para todos los componentes del rendimiento, excepto en número de hileras por mazorca (NHM). Con respecto a la interacción genotipo x ambiente (IG*A), los genotipos evaluados en tres ciclos de cultivo en Veracruz interaccionaron con los ambientes solo para seis de las 18 variables, mientras que en

Cuadro 2.2. Cuadrados medios del análisis combinado con maíces Tuxpeños (primero), análisis de Valles Altos (segundo) y análisis de Veracruz (tercero), 2013-2014.

FV	GL	REN	DFM	DFF	APL	AMZ	NHT	NHA	LTE	LSR	LRC
Análisis combinado de seis ambientes											
A	5	11.56**	7213.27**	7340.91**	7109.75**	6349.94**	36.57**	2.11**	17.14	66.16**	49.58**
G	2	17.15**	279.01**	320.90**	1787.39**	725.17**	1.43 *	0.16	66.06**	41.70**	19.48 *
IG*A	10	2.54**	24.55**	27.81**	31.76	45.50	1.20**	0.27 *	18.72	20.48**	16.96**
Error	24	0.75	5.65	5.86	78.58	93.44	0.36	0.09	9.52	2.23	4.02
CV	-	34.88	2.66	2.64	3.96	7.41	3.94	5.51	5.23	3.84	7.73
\bar{X}	-	2.48	89.37	91.37	223.30	130.34	15.23	5.60	58.93	38.86	25.92
Análisis de tres ambientes del Estado de México											
A	2	0.31	83.25**	269.08**	2274.55**	401.35 *	4.23**	1.16**	89.65**	24.71**	9.42
G	3	49.12**	791.43**	675.18**	2116.32**	505.79**	33.65**	4.27**	314.37**	33.72**	139.24**
IG*A	6	17.61**	28.54**	35.71**	499.76**	531.33**	1.28**	0.38**	16.92	6.50**	38.29**
Error	18	1.74	6.31	10.34	96.34	85.25	0.29	0.08	13.84	1.61	3.85
CV	-	34.67	2.26	2.83	3.94	6.06	3.40	5.02	6.07	3.11	7.21
\bar{X}	-	3.81	110.75	113.33	248.62	152.34	16.05	5.62	61.29	40.76	27.18
Análisis de tres ambientes de Veracruz											
A	2	11.01**	356.14**	440.48**	5154.84**	4385.04**	2.36**	0.39 *	4.05	132.12**	69.53**
G	2	1.81	62.03**	74.48**	1182.45**	309.17	0.27	0.03	87.56**	82.54**	50.46**
IG*A	4	0.20	2.92	3.37	211.08	256.06	1.28 *	0.17	15.77	28.65**	17.77 *
Error	18	0.76	3.51	1.96	77.58	101.83	0.31	0.09	7.56	3.19	3.98
CV	-	40.58	2.93	2.12	4.30	9.10	4.18	5.79	4.62	4.71	7.49
\bar{X}	-	2.15	63.85	65.81	204.73	110.82	13.45	5.25	59.47	37.92	26.61

**,* = Significativo a $P \leq 0.01$, $P \leq 0.05$, respectivamente; FV = Fuente de variación; A = Ambiente; G = Genotipos; IG*A = Interacción Genotipo*Ambiente; CV = Coeficiente de variación; \bar{X} = Promedio de la variable; GL = Grados de libertad; REN = Rendimiento de grano; DFM, DFF = Días a floración masculina y femenina, respectivamente; APL, AMZ = Altura de planta y de mazorca, respectivamente; NHT, NHA = Número de hojas totales y arriba de la mazorca, respectivamente; LTE, LSR, LRC = Longitud total, del segmento ramificado y de rama central de la espiga, respectivamente.

Cuadro 2.2. Continuación...

FV	GL	NRP	NRS	LMZ	DMZ	NHM	NGH	PCG	PVM
Análisis combinado de seis ambientes									
A	5	342.25**	45.14**	3.06	0.35**	6.66**	28.88	27.04	462.79**
G	2	20.42	3.73 *	7.02**	0.43**	4.86**	43.48	21.54	728.26**
IG*A	10	24.69**	1.38	5.35**	0.14**	0.88 *	23.95	9.32	87.68**
Error	24	5.05	1.08	1.49	0.03	0.35	15.82	15.62	17.99
CV	-	12.52	25.63	8.10	4.59	4.35	12.23	17.83	2.91
\bar{X}	-	17.94	4.06	15.08	4.17	13.69	32.51	22.16	145.64
Análisis de tres ambientes del Estado de México									
A	2	0.03	12.26**	7.54 *	0.24**	0.48	44.80 *	111.07**	224.63**
G	3	463.75**	55.18**	20.24**	0.87**	33.38**	50.28**	173.87**	282.00**
IG*A	6	3.76	1.89	2.03	0.09 *	0.57	19.55	30.69	25.93
Error	18	3.47	1.05	1.58	0.03	0.54	8.43	11.73	14.01
CV	-	9.26	21.62	8.16	3.89	4.80	8.93	14.04	2.53
\bar{X}	-	20.11	4.75	15.40	4.47	15.35	32.52	24.39	147.89
Análisis de tres ambientes de Veracruz									
A	2	1.58	0.98	0.72	0.16	1.24	30.24	44.08	785.25**
G	2	40.17**	1.56	1.21	0.78**	0.92	0.85	56.69	578.96**
IG*A	4	21.51 *	0.92	5.76**	0.05	0.74	16.53	2.51	87.32 *
Error	18	5.53	0.64	1.01	0.04	0.33	20.33	22.04	20.64
CV	-	19.08	37.10	6.59	5.46	4.50	13.79	21.22	3.18
\bar{X}	-	12.32	2.15	15.27	4.03	12.94	32.68	22.12	142.57

**, * = Significativo a $P \leq 0.01$, $P \leq 0.05$, respectivamente; FV = Fuente de variación; A = Ambiente; G = Genotipos; IG*A = Interacción Genotipo*Ambiente; CV = Coeficiente de variación; \bar{X} = Promedio de la variable; GL = Grados de libertad; NRP, NRS = Número de ramas primarias y secundarias, respectivamente; LMZ = Longitud de la mazorca; DMZ = Diámetro de la mazorca; NHM, NGH = Número de hileras y granos por hileras de la mazorca, respectivamente; PCG, PVM = peso de 100 granos y peso volumétrico de 200 mL de grano, respectivamente.

el análisis combinado 12 variables presentaron significancia en la IG*A, siendo sus cuadrados medios mayores que los de Veracruz en la mayoría de los casos. La similitud entre estos resultados se debió a que estos análisis únicamente incluyeron genotipos de maíz Tuxpeño, y esto se confirma con la concordancia entre los cuadrados medios para REN (11.56 y 11.01) y sus medias fenotípicas (2.48 y 2.15), en cambio, las diferencias en la IG*A entre estos dos análisis se debieron a los diferentes ambientes de evaluación y sus efectos ambientales sobre los genotipos, y a las respuestas diferenciales de estos a tales efectos. También es de resaltar en estos análisis que solo incluyeron maíz Tuxpeño, las variables NGH y PCG no tuvieron significancia en ninguna fuente de variación (Cuadro 2.2).

Con respecto al análisis de varianza de Valles Altos (Edo. de México), donde además de los Tuxpeños se incluyó al Compuesto Universal (CU), se detectó significancia entre ambientes en 14 de las 18 variables, excepto REN, LRC, NRP y NHM, indicando que la expresión promedio de estas cuatro variables fue muy similar a través de los ambientes de Valles Altos. Entre genotipos se obtuvo significancia para todas las variables, debido a que además de los Tuxpeños se tuvo a la variedad local CU, lo cual dio origen a que en este análisis se tuvieran los cuadrados medios más altos entre genotipos y en la IG*A para casi todas las variables, esto en comparación con los dos análisis que tuvieron solo Tuxpeños.

En relación con el coeficiente de variación (C.V.), en los tres análisis (Cuadro 2.2) este resultó de valor alto para REN (34.8 a 40.6 %) y NRS (25.6 a 37.1 %), mientras que para el resto de las variables el CV tuvo valores aceptables. Las significancias de los análisis de varianza de Veracruz y del Edo. de México indican lo contrastante que fueron los ambientes y la diferente expresión genética que tuvieron los genotipos evaluados. Los resultados de estos tres análisis coinciden con lo encontrado por De Jesús *et al.* (1990) y Pérez *et al.* (2000) para algunas variables estudiadas en compuestos de selección de Tuxpeño Crema 1 evaluados

solo en Valles Altos de México, donde la SMV produjo cambios significativos entre los ciclos: C0, C2, C11 y C12 para rendimiento.

Cambios en el rendimiento

Hubo significancia ($P \leq 0.01$) para REN entre ambientes, entre genotipos, y en la IG*A en el análisis combinado (Cuadro 2.2). Este resultado se debió a que las condiciones ambientales de las dos zonas geográficas son diferentes en altitud, precipitación, tipo de suelo, pH y temperaturas, principalmente, tal como se observa en el Cuadro 2.1; además, entre los genotipos las diferencias se debieron al número de ciclos de SMV que tienen estos, por lo que la combinación de efectos genéticos de genotipos y efectos ambientales ocasionó la significancia de la IG*A.

La comparación de medias (Tukey, $\alpha=0.05$) entre genotipos (Cuadro 2.3) indica que el C19 ‘avanzado’ tuvo el rendimiento promedio más alto, de 3.54 t ha^{-1} (superando la media nacional de 3.3 t ha^{-1}), seguido por C14 ‘intermedio’ y C0 ‘original’ con un rendimiento promedio de 2.29 y 1.62 t ha^{-1} , respectivamente. Los resultados del promedio de REN entre ambientes indican que la SMV ha sido efectiva en la raza Tuxpeño V-520C, ya que el C19 superó a sus ciclos inferiores, a pesar de haber sido evaluado tanto en clima tropical (lugar de origen), como en clima templado (lugar de adaptación).

Por otro lado, el análisis de varianza para Valles Altos detectó significancia ($P \leq 0.01$) entre Genotipos y en la IG*A para REN (Cuadro 2). Entre ambientes no hubo significancia, lo que pudo deberse a que se tuvieron siembras en dos ciclos agrícolas de la localidad de Montecillo (M 2013-PV y M 2014-PV), y otra en la localidad de Coatlinchán (C 2014-PV), la cual está muy cercana a la de Montecillo (Figura 2.1). La variedad local CU tuvo el mejor rendimiento con 6.79 t ha^{-1} , seguido por el C19 con 4.43 t ha^{-1} , y por el C14 y C0 con un promedio de 2.55 y 1.46 t ha^{-1} , respectivamente (Cuadro 2.3). La significancia entre genotipos concuerdan con lo reportado por Pérez *et al.* (2002; 2007) para el mismo material Tuxpeño V-520C; así

Cuadro 2.3. Promedios de 18 variables del análisis combinado con maíces Tuxpeños (primero), promedios de Valles Altos (segundo) y promedio del Estado de Veracruz (tercero), 2013-2014.

Ciclo	REN	DFM	DFF	APL	AMZ	NHT	NHA	LTE	LSR	LRC	NRP	NRS	LMZ	DMZ	NHM	NGH	PCG	PVM
Promedios del combinado de seis ambientes																		
C0	1.62b	91.88a	94.66a	233.35a	136.91a	15.52a	5.71a	59.59a	38.96b	25.81ab	17.35a	4.56a	14.38b	4.24a	13.26b	30.72a	23.40a	140.51b
C14	2.29b	91.38a	92.83a	223.14b	129.85ab	15.20ab	5.55a	60.42a	40.32a	27.01a	17.31a	3.96ab	15.58a	3.99b	13.53b	33.33a	21.35a	143.65b
C19	3.54a	84.83b	86.61b	213.42c	124.25b	14.96b	5.55a	56.77b	37.28c	24.93b	19.17a	3.66b	15.28ab	4.28a	14.27a	33.48a	21.72a	152.76a
DMS	0.72	1.98	2.01	7.37	8.04	0.49	0.25	2.56	1.24	1.66	1.87	0.86	1.01	0.15	0.49	3.31	3.29	3.53
Promedios de tres ambientes del Estado de México																		
C0	1.46c	119.00a	122.44a	249.38b	157.15a	17.41a	6.17a	57.52b	39.93b	25.34b	20.82b	6.50a	13.34b	4.21c	13.93c	29.04b	21.87b	141.33b
C14	2.55c	116.88a	117.66b	244.31bc	148.86ab	17.10ab	5.92ab	60.01b	39.74b	24.88b	24.70a	6.12a	15.78a	4.29bc	14.07c	34.03a	22.59b	150.91a
C19	4.43b	108.77b	110.66c	231.95c	143.54b	16.50b	5.78b	57.64b	39.72b	25.44b	25.18a	5.28a	15.54a	4.45b	15.31b	33.96a	22.13b	153.88a
CU	6.79a	98.33c	102.55d	268.83a	159.82a	13.21c	4.62c	69.98a	43.66a	33.07a	9.75c	1.12b	16.93a	4.91a	18.08a	33.06a	30.97a	145.45b
DMS	1.76	3.34	4.28	13.07	12.30	0.72	0.37	4.95	1.69	2.61	2.48	1.37	1.67	0.23	0.98	3.87	4.56	4.98
Promedios de tres ambientes de Veracruz																		
C0	1.77a	64.77a	66.88a	217.32a	116.67a	13.64a	5.25a	61.66a	38.00b	26.27b	13.88a	2.62a	15.42a	4.27a	12.60a	32.40a	24.94a	139.70b
C14	2.02a	65.88a	68.00a	201.97b	110.84a	13.30a	5.18a	60.84a	40.91a	29.13a	9.92b	1.81a	15.37a	3.70b	13.00a	32.63a	20.12a	136.39b
C19	2.64a	60.88b	62.55b	194.90b	104.95a	13.43a	5.31a	55.90b	34.85c	24.43b	13.16a	2.04a	15.02a	4.12a	13.23a	33.01a	21.31a	151.64a
DMS	1.09	3.51	1.76	11.07	12.69	0.70	0.38	3.45	2.24	2.51	2.95	1.00	1.26	0.27	0.33	5.67	5.90	5.71

DMS = diferencia mínima significativa; REN = Rendimiento de grano; DFM, DFF = Días a floración masculina y femenina, respectivamente; APL, AMZ = Altura de planta y de mazorca, respectivamente; NHT, NHA = Número de hojas totales y arriba de la mazorca, respectivamente; LTE, LSR, LRC = Longitud total, del segmento ramificado y de rama central de la espiga, respectivamente; NRP, NRS = Número de ramas primarias y secundarias, respectivamente; LMZ = Longitud de la mazorca; DMZ = Diámetro de la mazorca; NHM, NGH = Número de hileras y granos por hileras de la mazorca, respectivamente; PCG, PVM = peso de 100 granos y peso volumétrico de 200 mL de grano, respectivamente.

como con De Jesús *et al.* (1990) y Pérez *et al.* (2000), quienes utilizaron el germoplasma Tuxpeño Crema 1 para evaluar el rendimiento mejorado por SMV en Valles Altos de México.

La prueba de medias indica que el CU fue superior en REN al C19 en Valles Altos a pesar de los 19 años con SMV recurrente en este último. Por otro lado, el análisis de varianza de los tres ensayos en la localidad de Tepetates en el Estado de Veracruz (Cuadro 2.2) detectó significancia entre ambientes para REN, donde solo se incluyeron los tres genotipos de la raza Tuxpeño (Cuadro 2.3). La significancia entre ambientes pudo deberse a que dos ensayos se evaluaron en el periodo de primavera-verano y uno en otoño-invierno, es decir, las condiciones de precipitación y temperatura no fueron similares en los tres ensayos (Cuadro 2.1).

Cambios adaptativos en caracteres agronómicos

De acuerdo con los análisis de varianza combinado general y de Valles Altos (Cuadro 2.2) hubo significancia entre ambientes, entre genotipos, y en la IG*A para DFM y DFF, mientras que en el análisis de varianza de Veracruz solo hubo significancia entre ambientes y entre genotipos para las dos variables (Cuadro 2.2). Al no ser significativa la IG*A en Veracruz y sí en el análisis combinado, se puede inferir que la interacción fue contrastante entre los análisis, porque en Veracruz los ensayos se llevaron a cabo en la misma localidad, siendo por lo tanto los mismos genotipos para los dos análisis. En el análisis combinado, los genotipos C0 y C14 tuvieron medias similares para las dos variables; así, en DFM tuvieron un promedio de 91.8 y 91.3 días, respectivamente, mientras que en DFF tuvieron medias de 94.6 y 92.8 días, respectivamente; siendo diferentes al C19, pues este material fue el más precoz de los tres genotipos, con promedios de 84.8 DFM y 86.6 DFF.

El análisis combinado de Valles Altos indica que los genotipos tuvieron los mayores promedios; así, para DFM C0 y C14 tuvieron valores de 119 y 116.8 días, respectivamente,

mientras que el C19 tuvo 108.7 días, y el material local CU tuvo el promedio más bajo, con 98.3 días. Para DFF el C0 tuvo 122.4 días, siendo el más tardío, seguido por C14 con 117.6 días, C19 con 110.6 días, y CU con 102.5 días (Cuadro 2.3). Esto indica que el CU es el material más precoz de esta zona geográfica para las dos variables, por ser una variedad originaria de Valles Altos y por tanto localmente adaptada. En este sentido, lo recomendable para Valles Altos es disminuir el número de días a las floraciones, ya que con ello se disminuye el riesgo por problemas con heladas tempranas y se aumentan los días para el llenado de grano (Barrales *et al.*, 1984); por lo tanto, el mejor genotipo con estas características fue el CU, ya que disminuyó 10.4 DFM y 8.1 DFF con respecto al C19, además tuvo el mejor rendimiento de grano. No obstante, el C19 fue más precoz por 10.3 DFM y 11.8 DFF con respecto al C0; en este contexto, se ha documentado que la SMV recurrente es un método eficaz para reducir los DFM y DFF. Así, De Jesús *et al.* (1990) y Pérez *et al.* (2000; 2002; 2007) lograron reducir los DFM con un máximo de 14.4, 17.1, 3.2 y 5.6 días con relación al C0, respectivamente, en la raza Tuxpeño: Crema 1 (los dos primeros) y V-520C (los dos últimos) seleccionados bajo el método de SMV y evaluados en clima templado. Tal parece que Tuxpeño Crema 1 disminuye los DFM con mayor rapidez; esto pudo suceder porque este genotipo es un compuesto formado por ocho razas Tuxpeño, entre ellas V-520C. Finalmente, la prueba de medias detectó que en Veracruz los genotipos C0 y C14 tuvieron medias similares altas en los DFM (64.7 y 65.8, respectivamente) y DFF (66.8 y 68.0, respectivamente), mientras que el C19 (el más avanzado en SMV) tuvo promedios de 60.8 y 62.5 respectivamente para cada variable, lo cual indica que fue más precoz que los ciclos inferiores, tal como se comprobó en la zona de Valles Altos para las dos variables.

La altura de planta (APL) y la altura de la mazorca superior (AMZ) tuvieron significancia ($P \leq 0.01$) entre ambientes y entre los genotipos en el análisis combinado, mientras que en el análisis de varianza de Valles Altos, además de ambientes y genotipos, también la interacción

IG*A resultó significativa para las dos variables. En cambio en Veracruz, APL tuvo significancia entre ambientes y entre genotipos, mientras que AMZ solo tuvo significancia entre ambientes (Cuadro 2.2).

En el análisis combinado, la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) detectó que los genotipos tuvieron promedios diferentes para APL y AMZ, excepto para AMZ en el C14 (Cuadro 2.3). Para APL y AMZ el C0 midió 233.3 y 136.9 cm, respectivamente, siendo las plantas más altas; el C14 midió 223.3 y 129.8 cm, siendo intermedio, y los promedios más bajos los tuvo el C19 con 213.4 y 124.2 cm, respectivamente, lo cual agronómicamente es más conveniente.

En tanto, en el análisis de Valles Altos la variedad local CU fue el material de mayor APL y AMZ, con 268.8 y 159.8 cm, respectivamente; seguido por el C0 y C14, siendo el más bajo el C19 con 231.9 y 143.5 cm, respectivamente. Lo anterior indica que la SMV es un método efectivo para reducir la altura de planta y de mazorca, pues en la selección para adaptación del maíz Tuxpeño a los Valles Altos se buscaron plantas rendidoras de bajo porte de planta. Por su parte, De Jesús *et al.* (1990) y Pérez *et al.* (2000), encontraron que su ciclo de selección más avanzado presentó valores ligeramente mayores de APL y AMZ con respecto al C0, lo que es diferente a los resultados de esta investigación, los cuales sugieren que la APL y AMZ van en descendencia conforme avanza la SMV, quedando el C19 con el menor tamaño de planta y altura a la mazorca, tal como resultó en el análisis combinado. Al respecto, se puede mencionar que esta discrepancia pudo ocurrir por el genotipo utilizado, ya que el material Tuxpeño V-520C evaluado en este trabajo es uno de los ocho que integran el Tuxpeño Crema 1 evaluado por De Jesús *et al.* (1990) y Pérez *et al.* (2000), y por lo tanto, debe tener un comportamiento diferente. También en Veracruz se redujo la APL y la AMZ conforme avanzó la SMV, independientemente de que en este ambiente la AMZ no tuvo significancia entre genotipos.

Para las variables número de hojas totales (NHT) y número de hojas arriba de la mazorca (NHA) hubo significancia en las tres fuentes de variación del análisis combinado, excepto entre genotipos para NHA. En el análisis de Valles Altos hubo significancia en las tres fuentes de variación para las dos variables. En el análisis de Veracruz no hubo significancia para las dos variables entre los genotipos, pero NHT y NHA sí mostraron significancia entre ambientes y en la IG*A (Cuadro 2.2). En el Cuadro 2.3 se observan los promedios del análisis combinado de NHT y NHA para los genotipos, donde para NHT quedaron de mayor a menor: C0 (15.5), C14 (15.2), C19 (14.9), y para NHA quedaron: C0 (5.7), C14 y C19 (5.5).

Al igual que para rendimiento, en los días a floración, en las alturas, en el NHT y en el NHA existió un marcado contraste entre los promedios de las dos zonas geográficas. Por un lado, los materiales de Valles Altos tuvieron mayor NHT y NHA que los genotipos en Veracruz, con excepción del CU que no se desarrolló en el trópico y no se pudo medir. Los promedios de NHT en Valles Altos fueron los siguientes: C0 con 17.4 (el mayor), seguido por C14 y C19 con 17.1 y 16.5, respectivamente, y en último lugar el CU con 13.2; mientras que para el NHA los valores fueron: C0 con 6.1 (el mayor), C14 con 5.9, C19 con 5.7, y en último lugar al CU con 4.6. Estos resultados indican que el compuesto de selección más avanzado de Tuxpeño tiende a ser similar en número de hojas a la variedad local adaptada. En tanto, en Veracruz los genotipos mostraron valores menores; para NHT fueron: C0 (13.6, el más alto), C14 (13.3, el más bajo) y C19 (13.4); y para NHA: C0 (5.2), C14 (5.1, el más bajo) y C19 (5.3, el más alto), aunque entre genotipos no hubo significancia para las dos variables, pero se hace evidente que el NHT y NHA disminuyeron conforme se avanzó en la SMV. De acuerdo con De Jesús *et al.* (1990), en Valles Altos el Tuxpeño Crema 1 disminuyó el NHT solo en una unidad a través del ciclo 0 al 11 (no incluyendo el ciclo 1), mientras tanto, Pérez *et al.* (2000) encontraron una reducción del NHA, en la misma raza. En ambos trabajos, se tenía

como propósito adaptar dicha raza a Valles Altos por SMV recurrente. Esto concuerda con los resultados para NHT y NHA, pues se redujo 0.6 y 0.2 hojas, respectivamente, entre los genotipos C0 y C19 en el análisis combinado, de 0.9 y 0.4 hojas en el análisis de Valles Altos (entre los mismos genotipos), y para Veracruz se tuvo una mayor disminución entre los genotipos C0 y C14 de 0.3 en el NHT y en los genotipos C14 y C19 de 0.2 en el NHA.

Por último, se pudo observar que la IG*A fue significativa en los tres análisis de varianza para las dos variables, excepto para NHA en Veracruz, lo que significa que las condiciones edafoclimáticas de cada región, es decir, la altitud, tipos de suelo, pH, precipitación y temperaturas fueron diferentes entre ambientes y tuvieron efectos distintos sobre los genotipos (Cuadro 2.1).

Cambios adaptativos en las características de espiga

El análisis de varianza combinado detectó significancia entre ambientes, entre genotipos, y en la IG*A para las variables longitud del segmento ramificado (LSR) y longitud de rama central (LRC), mientras que la longitud total de la espiga (LTE) mostró significancia solo para genotipos (Cuadro 2.2). En Valles Altos la excepción fue en IG*A para la LTE y entre ambientes para LRC. En Veracruz, al igual que en el combinado, LTE no fue significativa entre ambientes y en la IG*A.

La prueba de medias del análisis combinado indicó que para las tres variables (LTE, LSR y LRC) el C14 obtuvo los mayores valores (60.4, 40.3 y 27.0), el C19 los menores (56.7, 37.2 y 24.2) y el C0 tuvo valores intermedios. Por otro lado, los promedios en Valles Altos tuvieron significancia, encontrándose que la variedad CU tuvo los valores más elevados en LTE, LSR y LRC, con 69.9, 43.6 y 33.0 cm, respectivamente, mientras que los genotipos de Tuxpeño (C0, C14 y C19) fueron inferiores estadísticamente al CU (Cuadro 3). La comparación de medias del análisis de Veracruz resultó similar a la del análisis combinado, donde el C14 tuvo los mayores promedios, con excepción de la variable LTE donde el promedio más alto fue

para C0 con 61.6 cm, teniendo los menores promedios en las tres variables el C19 (Cuadro 2.3).

El análisis combinado para número de ramas primarias y secundarias de la espiga (NRP, NRS) detectó significancia entre ambientes, pero no entre genotipos para NRP y en la IG*A para NRS. En Valles Altos solo hubo significancia entre ambientes y entre genotipos para NRS. En Veracruz solo hubo significancia entre genotipos y en la IG*A para NRP (Cuadro 2.2).

La prueba de medias general indicó que el C19 tuvo el mayor NRP (19.1), seguido por C0 y C14 (17.3, en ambos), mientras que el C0 obtuvo el mayor NRS (4.5) y C19 el menor (3.6) (Cuadro 2.3). La prueba Tukey ($\alpha=0.05$) de Valles Altos indicó que los promedios más bajos los tuvo el CU con valores de 9.7 para NRP y 1.1 para NRS, mientras que los ciclos de Tuxpeño tuvieron valores entre 20.8 (C0) a 25.1 (C19) y entre 5.2 (C19) a 6.5 (C0), para las respectivas variables. En Veracruz, los promedios de las variables NRP y NRS, de mayor a menor, quedaron de la siguiente manera: C0, C19 y C14, con valores de 13.8 y 2.6, 13.1 y 2.0, 9.9 y 1.8, respectivamente. Al respecto de los valores de estas variables, Pérez *et al.* (2000) encontraron que el NRP va disminuyendo a medida que avanza en la SMV, tal como se presenta en el NRS. Posiblemente en el trópico húmedo, el Tuxpeño transpira más por la alta temperatura y humedad relativa del ambiente, por lo que presenta espigas más grandes y ramificadas, en cambio eso no ocurre en Valles Altos, donde el ambiente es más frío y seco, por lo que los materiales locales tienen espigas pequeñas y muy poco ramificadas. El contraste generado en el NRP por los materiales evaluados en Valles Altos, excepto el CU, entre este trabajo y el de Pérez *et al.* (2000) pudo deberse a los diferentes genotipos utilizados en los dos estudios, ya que en dicho autores utilizaron la raza Tuxpeño Crema 1, mientras en este trabajo fue Tuxpeño V-520C. Otra diferencia del NRP sucedió entre los resultados de la evaluación en Veracruz y el trópico húmedo de Puebla, donde López-Morales *et al.* (2014)

encontraron un promedio de 20.4 ramas para la raza Tuxpeño Vera-39, lo cual es 6.5 unidades más elevado con respecto al C0 (13.8), tal diferencia pudo deberse al tipo de razas evaluadas y altitudes con una diferencia de 315 m.

Componentes del rendimiento

En el análisis combinado hubo significancia ($P \leq 0.01$) entre genotipos y en la interacción genotipo x ambiente para longitud de mazorca (LMZ) y diámetro de mazorca (DMZ); entre ambientes solo DMZ fue significativa (Cuadro 2.2). En Valles Altos las variables fueron significativas en las tres fuentes de variación, excepto la IG*A para LMZ. En Veracruz hubo significancia en la IG*A para LMZ y entre genotipos para DMZ (Cuadro 2.2).

La comparación de medias de Tukey ($\alpha=0.05$) indicó que en general el promedio más alto en LMZ lo tuvo el C14 con 15.5 cm y el más bajo resultó el C0 con 14.3 cm (Cuadro 2.3), mientras que para DMZ, C19 tuvo el valor mayor con 4.2 cm y el más bajo fue C14 con 3.9 cm. En Valles Altos el CU tuvo los promedios más altos en LMZ y DMZ, con 16.9 y 4.9 cm, y el más bajo fue el C0 con 14.3 y 4.2 cm, respectivamente. Estos resultados concuerdan con los de De Jesús *et al.* (1990) y Pérez *et al.* (2000), donde el CU contó con los valores más altos en DMZ y discrepan en ambos trabajos con la LMZ que tuvo los valores menores, donde tales autores evaluaron la raza Tuxpeño Crema 1 con menos ciclos de SMV recurrente. De los cuatro genotipos evaluados en Valles Altos, el material C19 coincidió con lo reportado por Wellhausen *et al.* (1951) para la variable de DMZ con un valor de 4.4 cm; esto pudo suceder porque estos autores evaluaron el material en Celaya y Chapingo, esta última muy cerca de la localidad de Montecillo. Los resultados de García *et al.* (2002) también coinciden con el DMZ de este trabajo al evaluar la raza Tuxpeño Crema 1 con 12 ciclos de SMV en Valles Altos, y también concuerdan con la LMZ de 15.7 cm del C14 de la raza Tuxpeño V-520C.

En Veracruz, los genotipos no tuvieron diferencias significativas entre los promedios de LMZ pero sí para el DMZ, donde los ciclos 0 y 19 tuvieron los valores más altos (4.2 y 4.1 cm, respectivamente) y el ciclo 14 el más bajo (3.7 cm). Los resultados indican que el ciclo 0 (el más alto), al estar en su ambiente original superó a los demás genotipos, seguido por el ciclo 19, que tuvo frecuencias alélicas favorables, acercándose al C0 y el cual obtuvo el mejor rendimiento en Veracruz.

En cuanto al número de hileras por mazorca (NHM), hubo significancia en las tres fuentes de variación del análisis combinado, en tanto que el número de granos por hilera (NGH) no fue significativo en el mismo análisis (Cuadro 2.2). En Valles Altos solo hubo significancia entre genotipos para NHM, y entre ambientes y genotipos para NGH. En Veracruz no hubo diferencias para las dos variables en ninguna fuente de variación (Cuadro 2.2).

En general, el C19 resultó el mejor genotipo para las dos variables, pues su NHM fue de 14.2 y su NGH fue de 33.4 (Cuadro 2.3), mientras que el genotipo C0 fue el de menor valor para las dos variables. En Valles Altos los mejores genotipos fueron la variedad local CU con 18.0 hileras y el material C14 con 34.0 granos por hilera. Las variables NGH y NHM aumentaron significativamente junto con el rendimiento conforme avanzaron el número de ciclos de SMV; esto mismo ocurrió con los resultados De Jesús *et al.* (1990) y Pérez *et al.* (2000) en las mismas variables de la raza Tuxpeño Crema 1, donde también el NGH fue grande en sus ciclos intermedios. Los mismos comportamientos ocurrieron con los genotipos en Veracruz para estas dos variables.

El análisis combinado no detectó diferencia estadística para el peso de cien granos (PCG) en ninguna de las fuentes de variación, pero sí la hubo para el peso de 200 mL (PVM) de semilla en las tres fuentes (Cuadro 2.2). El análisis de Valles Altos solo detectó significancia entre ambientes y genotipos para las dos variables. En Veracruz la variable PCG no fue significativa en ninguna de las fuentes, mientras que el PVM en todas las fuentes tuvo

significancia, lo que indica que hubo cambios por efecto de la selección en la adaptación entre genotipos para esta variable (Cuadro 2.2).

La comparación de medias entre genotipos del análisis combinado indicó que el C0 tuvo el mejor promedio de PCG con 23.4 g, aunque no hubo significancia entre genotipos. Lo contrario sucedió con el PVM, donde el C19 resultó con un peso de 200 mL 152.7 g, mientras que C0 y C14 tuvieron promedios menores (Cuadro 2.3). En Valles Altos el CU tuvo el PCG más elevado con 30.9 g, y para PVM los genotipos C14 y C19 tuvieron promedios de 150.9 y 153.8 g, respectivamente. En Veracruz el PCG no tuvo significancia, pero el C0 fue el mejor genotipo con 24.9 g, mientras que en PVM el C19 tuvo el mayor peso, con 151.6 g. Estos resultados de PCG coinciden con los de Pérez *et al.* (2000), aunque ellos obtuvieron promedios superiores, lo cual pudo deberse al genotipo utilizado, que fue Tuxpeño Crema 1 SM12. Para la variable PCG no hubo significancia entre los genotipos de Tuxpeño en el análisis combinado y de Veracruz, ambos con promedios de 22.1 g (Cuadro 2.2), pero los resultados de los genotipos contrastan ligeramente con los de Salinas *et al.* (2013), quienes encontraron una media de 33.7 g para la raza Tuxpeño, lo que pudo deberse a que evaluaron material mejorado generado en el Estado de Oaxaca. Por último, en PVM se observan aumentos conforme se avanza en ciclos de SMV, pero solo los ciclos C14 (150.9 g) y C19 (153.8 g) superaron al testigo CU (145.4 g) en Valles Altos. Por último, no se encontraron diferencias significativas para la variable de PVM en la raza Tuxpeño en las diferentes regiones de este estudio.

2.6 CONCLUSIONES

Los análisis de varianza indicaron que el maíz Tuxpeño V-520C experimentó cambios adaptativos por efecto de la Selección Masal Visual (SMV) para adaptación que se le aplicó en Valles Altos, pues en al menos un análisis hubo significancia entre ambientes y entre genotipos para el rendimiento de grano, así como para las características agronómicas, las

cuales expresaron los mayores cambios adaptativos, y los caracteres de espiga y los componentes de rendimiento, que tuvieron cambios adaptativos en menor proporción. La SMV del Tuxpeño V-520C aumentó el rendimiento y sus componentes conforme se avanzó en ciclos (C0, C14 y C19), y los caracteres agronómicos y de espiga (excepto el número de ramas primarias), fueron disminuyendo. En particular, la SMV tuvo efectos favorables en el C19 (con 19 ciclo de selección), este genotipo redujo los días a las floración, la altura de planta, el número de hojas totales y los tamaños de la espiga, e incrementó el número de ramas primarias de la espiga y los componentes de rendimiento (caracteres de la mazorca), por lo que este ciclo fue el de mayor rendimiento (3.5 t ha^{-1}) en el análisis combinado, superando a los ciclos inferiores C0 y C14. A medida que se avanza en la selección, el genotipo C19 tuvo características similares a las del Compuesto Universal raza Charqueño (utilizado como testigo) en los Valles Altos; así mismo, cuando se evaluó el C19 (adaptado ya al clima templado) en su clima de origen cálido subhúmedo, este respondió de manera tal que sus características fueron similares o superiores a las del C0.

2.7 LITERATURA CITADA

- Barrales, D. S.; Muñoz, A. O. y Sotres D. R. 1984. Relaciones termopluviométricas en familias de maíz bajo condiciones de temporal. *Agrociencia* 58: 127-139.
- Bellón, 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. México, D. F. CIMMYT. 58 p.
- Castillo, G. F. 1993. La variabilidad genética y el mejoramiento de los cultivos. *Ciencia* (número especial) 44: 69-79.
- 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 (2° edición). Universidad Nacional Autónoma de México. México. D. F. 246 p.
- Goodman, M. M. 2002. New sources of germplasm: Lines, transgenes and breeders. *In: El fitomejoramiento ante los avances científicos y tecnológicos*. Martínez, M. J.; Rincón, S. F. y Martínez, Z. G. (eds). Simposio. Buenavista, Saltillo, Coahuila. 2 de septiembre. UAAAN-SOMEFI, A. C. pp. 28-41.
- García, Z. J. J.; López, R. J.; Molina, G. J. y Cervantes, S. T. 2002. Selección masal y de familias de medios hermanos en maíz. *Fitotecnia Mexicana* 25(4): 387-391.
- Holley, R. N. and Goodman, M. M. 1988. Yield potential of tropical hybrid maize derivatives. *Crop Science* 28(2): 213-218.
- Kato, Y. T. A.; Mapes, S. C.; Mera, O. L. M.; Serratos, H. J. A. y Bye, B. R. A. 2009. Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. 116 p.
- López-Morales F.; Taboada-Gaytán, O. R.; Gil-Muñoz, A.; Antonio-López, P. and Reyes-López, D. 2014. Morphological diversity of native maize in the humid tropics of Puebla, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 17: 19-31.
- Molina, G. J. D. 1983. Selección masal visual estratificada en Maíz. Publicación especial. Centro de genética, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 36 p.
- Organización para la agricultura y la alimentación de las naciones unidas, división de estadística (FAOSTAT). 2016. Disponible en: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E> (Junio de 2016).
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, *Perspectivas Agrícolas 2014-2023* (OCDE-

FAO). 2014. OECD Publishing. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2014-es (Junio de 2015).

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.

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. *Fitotecnia Mexicana* 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.

Rocandio-Rodríguez, M.; Santacruz-Varela, A.; Córdova-Téllez, L.; López-Sánchez, H.; Castillo-González, F.; Lobato-Ortiz, R.; García-Zavala, J. J. y Ortega-Paczka R. 2014. Caracterización morfológica y agronómica de siete razas de maíz de los Valles Altos de México. *Fitotecnia Mexicana* 37(4): 351-361.

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. *Fitotecnia Mexicana* 36(1): 23-31.

Statistical Analysis System (SAS). 2002. *The SAS System for Windows 9.0. User's guide*. Cary, N. C. USA. 584 p.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2014. *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. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/resumen-nacional-por-estado/> (Agosto de 2015).

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. *Fitotecnia Mexicana* 35(3): 229-237.

Vázquez-Carrillo, M. G.; Arellano-Vázquez, J. L. y Santiago-Ramos. D. 2015. Rendimiento y calidad de grano y tortilla de maíces híbridos de Valles Altos de México crecidos en riego y temporal. *Fitotecnia Mexicana* 38(1): 75-83.

Wellhausen, J. E.; Roberts, M. L.; Hernández, X. E. en colaboración con Mangelsdorf, P. C. 1951. Razas de maíz de México, su origen, características y distribución. *Xolocotzia*. Tomo II. *Revista de Geografía Agrícola*. pp. 609-732.

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.

CAPÍTULO III

ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO Y CALIDAD DE TORTILLA DE MAÍZ TUXPEÑO ADAPTADO A VALLES ALTOS, MÉXICO

3.1 RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar la estabilidad del rendimiento de grano y de la calidad de nixtamal, masa y tortilla del maíz (*Zea mays* L.) Tuxpeño (V-520C), adaptado por Selección Masal Visual (SMV) a Valles Altos de México, mediante el modelo de sitios de regresión (SREG). La raza Tuxpeño es originaria del Estado de Veracruz, pero fue sometida a 14 (C14) y 19 (C19) ciclos de SMV “año con año” en Valles Altos. Entre los años 2013 y 2014 se evaluó el material original (C0), junto con C14 y C19, utilizando un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Las evaluaciones se realizaron en el Estado de México (clima de adaptación) y Veracruz (clima original), contando con tres experimentos en cada zona. El análisis de varianza detectó significancia ($P \leq 0.01$) entre ambientes, entre genotipos y en la interacción genotipo x ambiente para las ocho variables evaluadas. Las gráficas biplot GGE del modelo SREG indicaron que el C19 tuvo la mejor adaptación y la estabilidad para las variables: rendimiento de grano (3.54 t ha^{-1}), humedad de tortilla a las 24 horas (42.72 %), rendimiento de tortilla fría (1.44 Kg) y la menor fuerza de rompimiento de tortilla (193 g^f). Tales atributos fueron favorables de acuerdo con las industrias de la masa-tortilla. También, se pudo observar que el ambiente de Montecillo 2014 Primavera-Verano (localidad de Valles Altos y lugar donde se realizó la SMV) tuvo una gran afinidad con C19 en las mismas variables, discriminando entre genotipos, siendo el mejor del mega-ambiente.

Palabras clave: *Zea mays* L., biplot GGE, calidad de nixtamal, Selección Masal Visual, sitios de regresión (SREG).

STABILITY OF YIELD AND QUALITY OF TORTILLA MADE OF TUXPEÑO MAIZE ADAPTED TO HIGH VALLEYS OF MEXICO

3.2 ABSTRACT

The aim of this work was to assess the stability of grain yield quality of boiled maize ‘nixtamal’, dough, and tortilla made of Tuxpeño maize (*Zea mays* L.) adapted to High Valleys of Mexico through Visual Mass Selection (VMS) by using the regression sites model (SREG). The Tuxpeño race of maize is native to Veracruz state, but it was subjected to 14 (C14), and 19 (C19) year-to-year cycles of VMS in High Valleys. Between 2013 and 2014 the original material (C0) was assessed, along with the C14 and C19, using a random complete block design with three replications. The evaluations were performed in the State of Mexico (adaptation climate) and Veracruz (original climate). Three experiments were performed in each location. The analysis of variance detected significance ($P \leq 0.01$) among environments, among genotypes, and the environment x genotype interaction for the eight assessed variables. The biplot GGE graphs of the SREG model showed that the C19 obtained the best adaptation and stability for the variables: grain yield (3.54 t ha^{-1}), tortilla humidity after 24 hours (42.72%), yield of cold tortilla (1.44 kg), and the less tortilla tearing strength (193 g^f). Such attributes were favorable according to dough-and-tortilla industries. It was also observed that the Spring-Summer 2014 environment in Montecillo (location of High Valleys, and place where VMS was performed) had a great similarity with C19 in the same variables, discriminating among genotypes, and being the best location in the mega environment.

Key words: *Zea mays* L., biplot GGE, boiled maize quality, Visual Mass Selection, regression sites (SREG).

3.3 INTRODUCCIÓN

El rendimiento y la calidad de tortilla de las variedades de maíz (*Zea mays* L.) son aspectos importantes que deben considerarse para la industria de la masa y la tortilla (IMT) y la industria de harina nixtamalizada (IHN), esto cuando se realizan evaluaciones en diferentes condiciones agroclimáticas. Bajo este contexto, existe una amplia variabilidad para estas características, expresada tanto por los ambientes (E) de prueba o producción, los genotipos (G) evaluados o bajo producción, y por la interacción genotipo-ambiente (GE) (Vázquez *et al.*, 2012a). En México se producen cerca de 23 millones de toneladas de maíz anualmente, pero se consumen un poco más de 30 millones de toneladas (SE, 2012), con un aproximado de 200 kg *per cápita* (Aragón *et al.*, 2006), de los cuales 120 kg se consumen en forma de tortillas (Figueroa *et al.*, 2001), siendo este el producto final para el consumo humano.

En México se han documentado 59 razas de maíz (Sánchez *et al.*, 2000), de las cuales la raza Tuxpeño se distingue por su alto rendimiento y calidad de grano; dicha raza es originaria del Estado de Veracruz (Wen *et al.*, 2012). Castillo (1993) señaló que las razas de maíz son utilizadas por los programas de mejoramiento genético en su lugar de origen y que en pocas o nulas ocasiones son adaptadas a otros ambientes. No obstante, Molina (1983) sugirió la Selección Masal Visual (SMV) como un método para adaptar maíz a otras regiones. Diversos estudios han mostrado la efectividad de la SMV en la adaptación de materiales tropicales y subtropicales a climas templados, como los Valles Altos Centrales de México (> 2200 msnm) (Pérez *et al.*, 2002; 2007); específicamente en esta región, la raza Tuxpeño fue sometida a 12 ciclos de SMV, resultando materiales con más precocidad y rendimientos superiores que algunos de los germoplasmas localmente adaptados (Pérez *et al.*, 2000).

En las últimas dos décadas, el modelo multivariado de sitios de regresión (SREG) ha sido útil para estimar la estabilidad y la GE del rendimiento en el cultivo del maíz; este modelo explica la respuesta de los genotipos en ambientes específicos, eliminando el efecto de

localidad (Setimela *et al.*, 2010; Kandus *et al.*, 2010). SREG está representado en una grafica biplot GGE donde se muestran los efectos de los G e GE; además, se pueden identificar los genotipos sobresalientes en cada mega-ambientes, a partir de los dos primeros componentes principales (CP) del modelo (Yan *et al.*, 2001; Kandus *et al.*, 2010). El modelo SREG ha sido implementado para determinar la estabilidad y calidad de cereales básicos, como en el caso de maíz (Vázquez-Carrillo *et al.*, 2016), trigo (*Triticum aestivum* L.) (Castillo *et al.*, 2012) y arroz (*Oryza sativa* L.) (Samonte *et al.*, 2005).

La variedad de maíz V-520C de la raza Tuxpeño fue sometida a 14 y 19 ciclos de SMV para su adaptación a Valles Altos Centrales, con lo que se aumentó su rendimiento y adaptación año con año. Este trabajo consistió en evaluar el rendimiento de los materiales adaptados de V-520C junto con el genotipo original. Pero además del rendimiento, también es necesario conocer la calidad de nixtamalización para determinar cuál de las tres poblaciones cumple con las normas establecidas por las industrias de la masa-tortilla y/o la de harina nixtamalizada. El objetivo de este trabajo fue determinar la estabilidad del rendimiento y variables de calidad de nixtamal, masa y tortilla del maíz V-520C Tuxpeño adaptado con SMV a Valles Altos de México mediante el uso del modelo de sitios de regresión (SREG).

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético evaluado

El germoplasma utilizado fue maíz original de la raza Tuxpeño (V-520C) denominado ciclo cero (C0), así como dos genotipos obtenidos del material original mediante 14 (C14) y 19 (C19) ciclos de SMV. Este método fue propuesto por Molina (1983) y sugiere seleccionar plantas sanas y robustas, así como, mazorcas grandes, cilíndricas, sanas y de hileras rectas. La selección para adaptación de C14 y C19 se llevó a cabo en el Campo Experimental del Colegio de Postgraduado, 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

La raza Tuxpeño original C0, así como sus ciclos de SMV C14 y C19, fueron evaluados en las localidades de Montecillo (M 2013-PV y M 2014-PV) y en Coatlinchán (C 2014-PV), municipio de Texcoco, Estado de México, ambas localidades pertenecientes a los Valles Altos Centrales de México. También se establecieron tres experimentos en la localidad de Tepetates (T 2013-PV, T 2014-OI, T 2014-PV), municipio de Manlio Fabio Altamirano, Estado de Veracruz, correspondiente a la Vertiente del Golfo. El manejo agronómico y las características edafoclimáticas de las localidades se describen en el Cuadro 3.1. El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con tres repeticiones (Martínez, 1988), donde la unidad experimental consistió de dos surcos de 6 m de longitud, separados a 80 cm, donde se sembraron dos semillas cada 50 cm, lo que hizo un total de 52 plantas por parcela, obteniéndose una densidad de población de 50 mil plantas por hectárea.

Cuadro 3.1. Características del manejo agronómico y condiciones ambientales de las localidades de evaluación.

Localidad, año-ciclo*	Abreviado localidad	Ubicación Estado Mpio [¶]	Altitud (m)	Fertilización kg ha ⁻¹ de N-P	Tipo de suelo, pH	Precipitación [†] (mm)	T (°C) ^{††}	
							Máx	Mín
Montecillo, 2013-PV	M 2013-PV	MÉX. Tex	2250	140-60	Vertisol, 7.5	1277 ^a	29.0	6.0
Montecillo, 2014-PV	M 2014-PV	MÉX. Tex	2250	140-60	Vertisol, 7.5	1179 ^a	29.0	3.0
Coatlinchán, 2014-PV	C 2014-PV	MÉX. Tex	2300	140-40	Phaeozem, 6.2	1306 ^b	30.0	6.0
Tepetates, 2013-PV	T 2013-PV	VER. Man	20	110-46	Vertisol, 6.3	1227	35.9	21.2
Tepetates, 2014-OI	T 2014-OI	VER. Man	20	110-46	Vertisol, 6.3	26 ^c	42.2	10.6
Tepetates, 2014-PV	T 2014-PV	VER. Man	20	110-46	Vertisol, 6.3	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; † Precipitación total acumulada (del periodo siembra/cosecha); ^a, ^b, ^c = riego inicial + tres riegos auxiliares, riego inicial, diez riegos auxiliares, respectivamente; †† Máx = temperatura máxima; Mín = temperatura mínima (durante el periodo siembra/cosecha).

Manejo agronómico

En los dos años de evaluación en Montecillo se utilizó la fórmula de fertilización 140-60 (Kg ha⁻¹ de N-P), mientras que en Coatlinchán se usó 140-40 (Cuadro 3.1); en cada localidad de Valles Altos la aplicación de nitrógeno se dividió en dos partes, la primera al momento de la siembra y la segunda en las labores de cultivo, aplicando todo el fósforo al momento de la siembra. En las tres localidades se aplicó un riego inicial, pero sólo en los experimentos de

Montecillo se dieron tres riegos de auxilio durante el ciclo del cultivo. La dosis de fertilización en los tres experimentos de Tepetates en Veracruz fue 110-46, la cual se dividió de la siguiente manera: 64-18 al momento de la siembra y el resto en las labores de cultivo. Sólo al ensayo de Tepetates en el ciclo OI se le aplicó riego cada 10 días desde la siembra hasta el llenado de grano, ya que los ensayos establecidos en los ciclos PV en los años 2013 y 2014 fueron de temporal. En las seis localidades 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.

Variables evaluadas

El rendimiento de grano y las características de calidad de nixtamal, masa y tortillas se obtuvieron de acuerdo con el proceso descrito por Vázquez *et al.* (2015) y Vázquez *et al.* (2016). El rendimiento (REN) se obtuvo en $t\ ha^{-1}$ de grano mediante el peso seco de la mazorca 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 los índices de flotación (valores no presentados): valores entre 13 a 37 % de granos flotantes (correspondientes a endospermos duros) permanecieron 40 min en ebullición (genotipo C19); de 38 a 62 % de flotantes (intermedios), 35 min (genotipo C14); y de 63 a 87 % (suaves), 30 min (genotipo C0). En el licor de cocción (nejayote) se evaluó la pérdida de materia seca (PMS), y en el nixtamal el pericarpio retenido (PR) (Salinas y Vázquez, 2006). También se evaluó la humedad del nixtamal (HN), masa (HM) y tortilla de acuerdo con el método 44-10 (AACC, 2000). En las tortillas frías se evaluó el rendimiento (RTF) expresado como la cantidad de tortilla obtenida por kilogramo de maíz procesado, así como, la fuerza requerida para romperla (FT), expresada en gramos-fuerza (g^f) y medida con el texturómetro Brookfield® modelo CT3 (Middleboro, MA, USA), a las dos horas de terminada su elaboración (Vázquez *et al.*, 2015). Finalmente las tortillas frías se empacaron en bolsas de plástico con sellado

ziploc[®], y se almacenaron a 4 °C (refrigeración) durante 24 horas, para después determinar la humedad de tortilla (HT24).

Análisis estadístico

Los datos de rendimiento y variables de calidad de nixtamal, masa y tortilla fueron analizados con el modelo SREG (Yan *et al.*, 2001; Kandus *et al.*, 2010), mediante el paquete estadístico SAS para Windows, versión 9.0 (SAS Institute, 2002). Con este modelo se obtuvo una gráfica biplot por cada variable, graficando los dos primeros Componentes Principales (CP1 y CP2).

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza detectó significancia ($P \leq 0.01$) entre ambientes (E), entre genotipos (G) y en la interacción genotipo x ambiente (GE) para todas las variables evaluadas, excepto entre genotipos para la variable humedad de nixtamal (Cuadro 3.2). Estos resultados significan que la SMV propició cambios notables que diferenciaron entre genotipos, y que los ambientes fueron muy contrastantes en la expresión promedio de los materiales genéticos, lo que se vio reflejado en la significancia de la interacción GE.

Adaptación y estabilidad de rendimiento

La significancia estadística de la interacción GE para el REN indica que uno de los genotipos evaluados tuvo mejor adaptación a un ambiente específico; de igual manera, fueron significativos los dos componentes principales (CP1 y CP2) (Cuadro 3.2), que explicaron el 86.64 % y el 13.36 % de la variabilidad, respectivamente (Figura 3.1A). El desplazamiento de los ambientes hacia la derecha en la Figura 3.1A, muestra la influencia de los efectos principales en los genotipos. La longitud del vector de los ambientes indica la variabilidad en el rendimiento explicada por los ambientes, es decir, si el vector de un ambiente es largo implica una mayor diferencia en los rendimientos de los genotipos (Crossa *et al.*, 2015).

Cuadro 3.2. Cuadrados medios y nivel de significancia de los componentes del modelo SREG en rendimiento y variables de calidad de nixtamal, masa y tortilla de maíz Tuxpeño, evaluado en los Estados de Veracruz y México (2013-2014).

FV	GL	REN	Nixtamal			Masa		Tortilla		
			PMS	PR	HN	HM	HT24	RTF	FT	
E	5	11.56**	3.68**	2650.72**	39.90**	30.15**	30.79**	0.033**	13014.02**	
G	2	17.15**	0.98**	933.88**	0.17	6.45**	37.93**	0.017**	915.90**	
GE	10	2.54**	0.30**	83.54**	6.40**	5.19**	18.83**	0.004**	807.57**	
CP1	6	8.63**	0.44**	418.43**	10.19**	9.50**	43.42**	0.011**	1016.69**	
CP2	4	1.99 *	0.58**	48.15**	0.79	1.94	0.91	0.002 *	951.86**	
Error	34	0.75	0.05	3.34	1.05	0.98	0.91	0.001	48.94	
CV	-	34.88	5.09	4.29	2.03	1.65	2.32	2.293	3.47	
R ²	-	0.82	0.92	0.99	0.88	0.86	0.93	0.875	0.97	
\bar{x}	-	2.48	4.75	42.54	50.37	59.90	41.15	1.406	201.25	

** , * = $P \leq 0.01$ y $P \leq 0.05$, respectivamente; FV = Fuente de variación; E = Ambiente; G = Genotipos; GE = Interacción Genotipo*Ambiente; CP = Componente Principal; CV = Coeficiente de variación; R² = coeficiente de determinación; \bar{x} = Promedio de la variable; GL = Grados de libertad; REN = Rendimiento de grano; PMS = Pérdida de materia seca; PR = Pericarpio retenido; HN = Humedad de nixtamal; HM = Humedad de masa; HT24 = Humedad de tortilla a las 24 horas; RTF = rendimiento de tortilla fría; FT = fuerza para romper la tortilla.

Estos resultados permiten una interpretación confiable del comportamiento de los G y la GE, ya que en otras investigaciones de maíz con el modelo SREG se tuvo una regular variabilidad acumulada en los dos primeros componentes principales (Preciado *et al.*, 2006; Setimela *et al.*, 2010). En esta investigación los componentes CP1 y CP2 explicaron el 100 % de la variabilidad, en las ocho variable estudiadas (Figura 3.1A-3.1I), lo cual se atribuye al número de genotipos y de localidades incluidos, y resultados semejantes fueron observados por Ibáñez *et al.* (2006) al evaluar 13 híbridos de maíz en tres localidades, lo que indica que el estudio se concentró en la adaptación y estabilidad, tal como se observa en la variedad V-520C de la raza Tuxpeño, evaluada en diferentes ambientes y con distintos ciclos de SMV.

El modelo SREG permite detectar a los genotipos y ambientes con mayor adaptación y estabilidad, al mismo tiempo explica la GE, a través de una gráfica biplot GGE, que combina el efecto principal del G (CP1, eje de las abscisas) y la GE (CP2, eje de las ordenas) (Yan *et al.*, 2000). El biplot GGE se construye con los efectos de: G y GE (Yan y Rajca, 2002), adicionalmente forma un polígono con los genotipos más alejados del origen, donde se traza una línea perpendicular por cada lado del polígono, lo que da lugar entre ellas a cada mega-

ambiente, quedando el genotipo vértice como el de mejor desempeño entre los ambientes que pertenecen al mismo mega-ambiente (Yan *et al.*, 2000). Gráficamente los distintos mega-ambientes deben de ser los grupos de ambientes donde se evaluaron los genotipos que están aparentemente separados en el biplot. Por otro lado, los vectores que conectan a los ambientes con el origen forman ángulos, de donde se obtiene la correlación entre ellos; así mismo, la longitud de vectores es proporcional a la desviación típica del promedio de cada ambiente. En tanto, la adaptación y la estabilidad se reflejan por la dimensión de los CP1 y CP2, respectivamente, donde los genotipos ubicados en los cuadrantes con $CP1 > 0$ serán adaptados, es decir, que tendrán los promedios más altos, mientras que los no adaptados estarán en los cuadrantes con $CP1 < 0$. Por último, la estabilidad estará sujeta al eje del CP2, donde los genotipos más cercanos al eje serán estables y viceversa (Yan *et al.*, 2000; Yan y Rajca, 2002).

Así, el genotipo C19 ‘ciclo avanzado’ fue el de mayor rendimiento (3.54 t ha^{-1}), adaptación y estabilidad en los ambientes de estudio; en tanto que el C0 ‘original’ y el C14 ‘intermedio’, tuvieron un rendimiento promedio de 1.62 y 2.29 t ha^{-1} , respectivamente, resultando menores a la media nacional de 3.5 t ha^{-1} según SIAP (2015), y donde su ubicación en los cuadrantes izquierdos y lejanía del $CP2 = 0$, muestran su inestabilidad (Figura 3.1A).

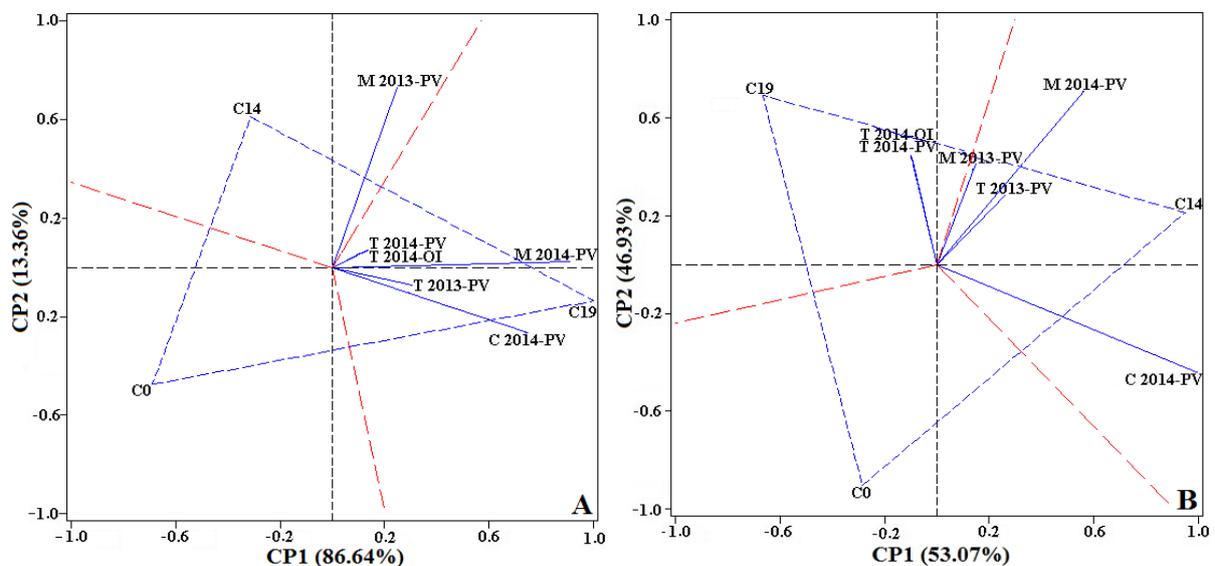


Figura 3.1. Continuación...

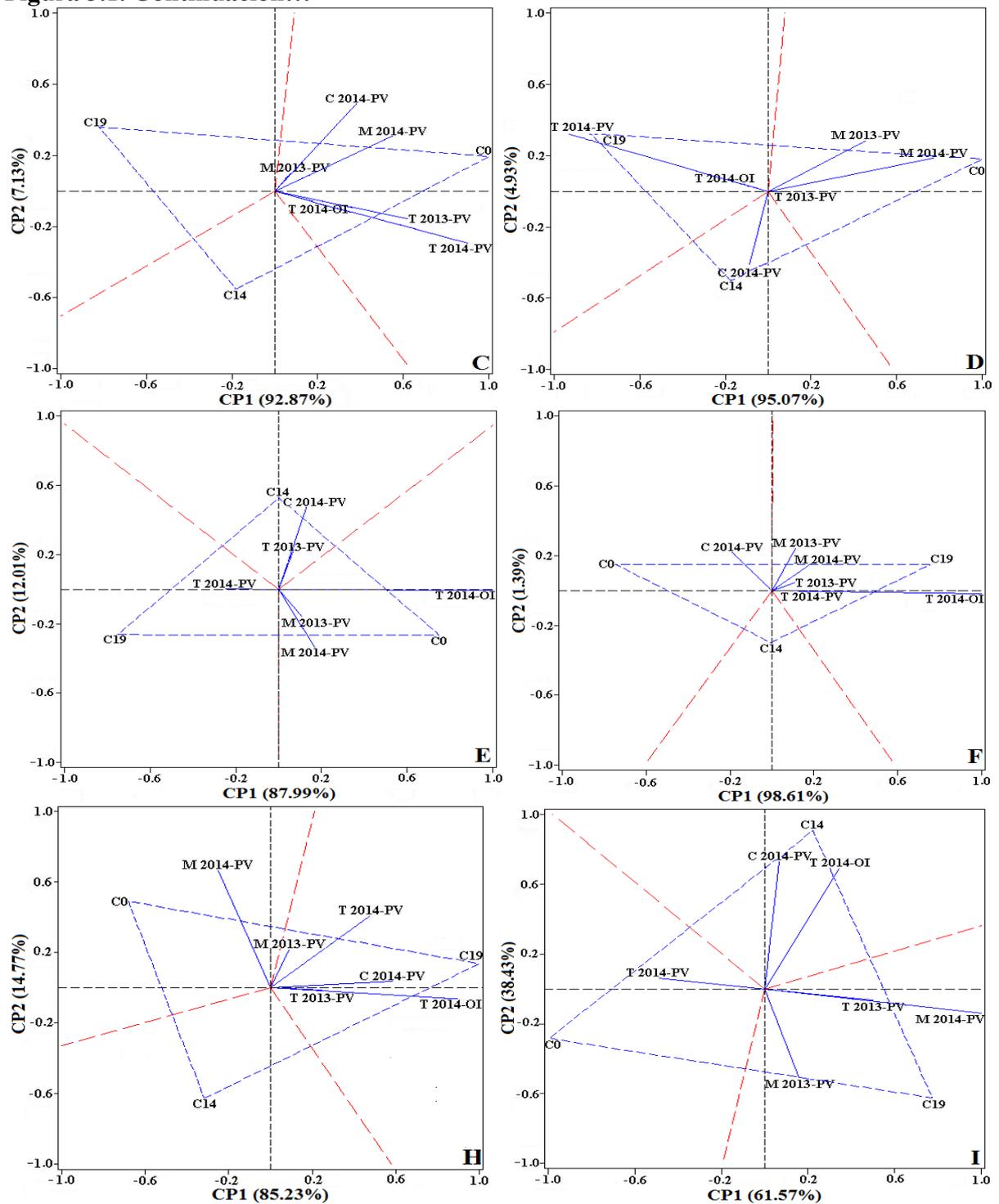


Figura 3.1. Biplot de los dos componentes principales del rendimiento de grano (A), pérdida de materia seca (B), pericarpio retenido (C), humedad de nixtamal (D), humedad de masa (E), humedad de tortilla a las 24 horas (F), rendimiento de tortilla fría (H) y fuerza de rompimiento de la tortilla (I) del modelo SREG con maíz Tuxpeño, evaluado en los Estados de Veracruz y México (2013-2014).

Por otra parte, los ambientes se ubicaron en el mega-ambiente del genotipo que obtuvo el más alto promedio del rendimiento dentro de cada ambiente. Esto significa que en la Figura 3.1A, el mega-ambiente del genotipo C19 tuvo los mejores rendimientos en todos los ambientes, excepto en M 2013-PV que se ubicó en el mega-ambiente de C14, lo que indica que para este ambiente el genotipo tuvo el promedio más alto del rendimiento de grano. En tanto, se debe mencionar también, que aunque los ambientes M 2013-PV y M 2014-PV tuvieron promedios idénticos (Cuadro 3.3), estos no fueron debido a los mismos genotipos, tal como lo señala la Figura 3.1A, al no colocarlos en un mismo mega-ambiente. Mientras que el mega-ambiente del genotipo C0 no tuvo ningún ambiente, lo que demuestra que tal genotipo fue el de menor rendimiento en todos los ambientes de prueba, lo cual se atribuye a que se trata de una variedad de polinización libre original de la raza Tuxpeño (V-520C) inadaptada a Valles Altos y cuyo ámbito de adaptación es el trópico húmedo del Estado de Veracruz, donde fue colectada (Márquez-Sánchez, 2008).

En otro sentido, Yan *et al.* (2000) señalan que al existir ángulos menores a 90° entre los vectores de ambientes, estos organizarán a los genotipos de manera muy similar, tal como sucedió con todos los ambientes que pertenecen al mega-ambiente del genotipo C19 (Figura 3.1A). En tanto, los ambientes que forman un ángulo mayor a 90° no guardan relación en la forma de ordenar a todos los genotipos, caso que sucedió entre los ambientes M 2013-PV y C 2014-PV. Los ambientes con la mayor longitud de vectores (M 2013-PV, C 2014-PV y M 2014-PV) fueron los que mejor discriminaron entre los genotipos (Yan *et al.*, 2007), esto por tratarse de ambientes de Valles Altos, donde se realizó la adaptación de los genotipos C14 y C19 con SMV. En tanto que 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 registraron temperaturas mayores y precipitaciones

más abundantes, así como menor dosis de fertilización, comparados con los ambientes de Valles Altos (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.3. Medias de los genotipos y ambientes del rendimiento y variables de calidad de nixtamal, masa y tortilla de maíz Tuxpeño, evaluado en los Estados de Veracruz y México (2013-2014).

Variables	REN	PMS	PR	HN	HM	HT24	RTF	FT
Fuente	t ha ⁻¹			%			Kg/Kg	g ^f
C0	1.62b	4.51c	50.54a	50.46a	60.46a	39.86c	1.39b	204.75a
C14	2.29b	4.98a	40.53b	50.27a	59.97ab	40.88b	1.38b	206.00a
C19	3.54a	4.76b	36.57c	50.39a	59.27b	42.72a	1.44a	193.05b
DMS	0.70	0.19	1.49	0.83	0.80	0.78	0.02	5.71
M 2013-PV	3.56a	4.50cd	28.21d	51.18b	60.99ab	43.12a	1.47a	163.33d
M 2014-PV	3.56a	4.22de	51.20b	52.75a	61.99a	43.22a	1.48a	162.66d
C 2014-PV	1.33b	5.25b	37.60c	50.54b	60.35b	39.43c	1.39b	204.44c
T 2013-PV	2.91a	4.71c	35.50c	50.05b	56.80d	41.33b	1.33c	215.22b
T 2014-OI	2.65a	5.74a	29.46d	51.22b	60.43b	38.71c	1.37bc	196.77c
T 2014-PV	0.88b	4.07e	73.32a	46.50c	58.85c	41.10b	1.37bc	265.11a
DMS	1.23	0.34	2.60	1.46	1.41	1.36	0.04	9.95
IMT	-	≤ 5	≥ 30	45-48	-	-	≥ 1.5	-
IHN	-	≤ 5	≤ 30	36-42	-	-	-	-

Variables: REN = Rendimiento de grano; PMS = Pérdida de materia seca; PR = Pericarpio retenido; HN = Humedad de nixtamal; HM = Humedad de masa; HT24 = Humedad de tortilla a las 24 horas; RTF = rendimiento de tortilla fría; FT = fuerza para romper la tortilla. Fuentes: C0, C14 y C19, genotipos sometidos a selección masal visual; localidades donde se evaluaron los tres genotipos; DMS = diferencias mínimas significativas para cada grupo; valores establecidos por la IMT (industria de la masa y tortilla) y por la IHN (industria de harina nixtamalizada).

Los resultados indican que la SMV es un método adecuado y eficiente para aumentar el rendimiento y la adaptación del maíz Tuxpeño V-520C a través del genotipo C19, pues tal genotipo tuvo el mejor rendimiento en cinco de los seis ambientes evaluados. 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 nixtamalización

Hubo significancia entre los ambientes (E), entre los genotipos (G) y en la interacción genotipo x ambiente (GE) para las variables de calidad de nixtamal, masa y tortilla, y en los primeros dos Componentes Principales (CP), excepto para HN entre G y CP2, HM y HT24 en CP2 (Cuadro 3.2). En todas las variables de calidad los CP1 y CP2 acumularon el 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, 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, este último se asigna de acuerdo con la dureza del grano (NMX-034/1, 2002) y tiene la finalidad de llevar el grano a un grado de hidratación semejante (Almeida-Domínguez *et al.*, 1997). En la pérdida de materia seca (PMS), se consideran los genotipos con menor PMS, así el C19 (por su posición en la Figura 3.1B), fue el de menor pérdida, mientras que el C0 fue el más inestable y menos adaptado entre localidades. En el extremo opuesto aparece el C14 con la mayor PMS por lo que demostró tener mayor adaptación ($CPI > 0$) y fue el más estable (Yan *et al.*, 2000). No obstante las diferencias entre genotipos, los tres registraron PMS menores a las declaradas como máximo (5.0 %) en la norma NMX-034/1 (2002) para los maíces destinados al proceso de nixtamalización. 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 el ambiente T 2014-PV fue el de menor PMS, lo que indica que en condiciones de trópico, el C19 fue de endospermo duro. La PMS de estos genotipos son acordes con lo señalado por Salinas y Aguilar (2010), quienes además indicaron que los maíces de endospermo intermedio perdieron más sólidos con respecto a los de endospermo duro. De acuerdo con los vectores de la Figura 3.1B, los ambientes que no guardaron ninguna relación en la forma de ordenar los genotipos (cerca de 90°) fueron T 2014-OI o T 2014-PV y C 2014-PV; sucediendo lo contrario con los demás ambientes (Yan *et al.*, 2000). Los resultados coinciden con los de Vázquez *et al.* (2012a, 2012b) en la significancia, donde la evaluación de híbridos se realizó en ambientes contratantes, pero en ambos trabajos se han obtenido valores inferiores a los aquí presentados para PMS en la prueba de medias (Cuadro

3.3), tanto en los genotipos como en los ambientes, así mismo para la raza Tuxpeño que reportó Vázquez *et al.* (2010) con PMS de 3.0.

Los ambientes C 2014-PV y T 2014-OI superaron el valor requerido por las industrias procesadoras (≤ 5.0 %), esto pudo suceder por sus diferentes tipos de suelo y precipitación, respectivamente (Cuadro 3.1). De acuerdo con la Figura 3.1B, el mega-ambiente de C14 tuvo cuatro ambientes, de los cuales el mejor ambiente fue M 2014-PV, ya que su promedio no sobrepasa lo requerido por las industrias y fue discriminante entre genotipos. Sin embargo, las industrias procesadoras requieren un PMS mínimo, en este sentido el mejor genotipo fue C19, por tener el mayor rendimiento de grano y encontrarse en su mega-ambiente el T 2014 PV, el cual obtuvo el menor promedio de la pérdida de sólidos en el nejayote.

La Figura 3.1C para el pericarpio retenido (PR) muestra que los seis ambientes y el genotipo C0 fueron los de mayor adaptación, correspondiendo todos los ambientes a este mega-ambiente, tal material fue estable, teniendo el mayor promedio de los genotipos con 50.54 % (Cuadro 3.3) y de todos los ambientes, donde sólo cuatro ambientes discriminaron bien entre genotipos (Figura 3.1C).

Todos los vectores de los ambientes en el PR 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 esta variable se observó una marcada diferencia entre las dos zonas de estudio, de acuerdo al CP2 el cual dimensiona la interacción GE, se localizó los ambientes de Valles Altos en la parte extrema derecha y los del Estado de Veracruz en la inferior derecha de la Figura 3.1C, lo cual indica que los genotipos están mejor adaptados a Valles Altos, donde se efectuó la SMV (Crossa, 1990). Los datos de REN y de PMS están correlacionados negativamente y son significativos con PR ($r = -0.44^{**}$ y $r = -0.60^{**}$, respectivamente) (Cuadro 3.3). Por lo cual, el porcentaje de pericarpio retenido fue disminuyendo conforme fue incrementando el rendimiento de grano (Cuadro 3.3) y aumentando la dureza del

endospermo en los genotipos. El C0 (el de más altos valores en PR) fue el más benéfico para el proceso de nixtamalización tradicional, pues aumenta la fibra que se aporta a la dieta, contribuye a la retención de agua, mejorando la textura de la masa y tortilla, tal como lo reportaron Salinas y Aguilar (2010) con maíces criollos.

Los resultados los trabajos de Zepeda *et al.* (2009) y Salinas *et al.* (2010) coinciden con los resultados y zonas de evaluación, Valles Altos y Estado de Veracruz, respectivamente. Sin embargo, Zepeda *et al.* (2009) no encontraron diferencias en la misma localidad de Montecillo, para PMS y PR en híbridos, tal como se encontró para la raza Tuxpeño obtenida por SMV. En este sentido Vázquez *et al.* (2010) observaron valores de PR de 39.1 % en la misma raza, promedio semejante al de los genotipos C14, C19 y los ambientes de Valles Altos, zona donde correspondió dicho estudio. Finalmente, solo los promedios de los ambientes T 2014-OI y M 2013-PV (los más estables) cumplieron los estándares de la IHN, mientras que los tres genotipos y demás localidades fueron ideales para la IMT. Por sus anteriores característica, menor pérdida de materia seca y mayor rendimiento de grano, el genotipo C19 es ideal para las industrias procesadores; resultados afines fueron encontrados por Vázquez *et al.* (2016) en Valles Altos para la variable de PR.

El genotipo C0 tuvo los valores más elevados en HN (50.46 %) y HM (60.46 %), mientras que C19 lo tuvo para HT24 (42.72 %) y RTF (1.44 Kg) y el C14 en FT (206.00 gramos-fuerza) (Cuadro 3.3). Estos mismos materiales fueron los más adaptados por cada variable antes mencionada, respectivamente, y para el caso de HN y FT se tuvo como genotipo estable a C0, mientras que para RTF el C19 fue estable, no así para HM y HT24, donde los genotipos estables fueron C0 y C19 para ambas variables (Figura 3.1D-3.1I). Por otro lado, el ambiente M 2014-PV tuvo el promedio más alto en cuatro variables, HN (52.75 %), HM (61.99 %), HT24 (43.22 %) y RTF (1.48 Kg), mientras que para FT (265.11 g^f) el ambiente con mayor promedio fue T 2014-PV. En tanto, el promedios más bajo para diferentes variables fue como

sigue: T 2014-PV para HN (46.50 %), T 2013-PV para HM (56.80 %) y RTF (1.33 Kg), T 2014-OI para HT24 (38.71 %) y M 2014-PV para FT (162.66 g^f) (Cuadro 3.3). En particular, los promedios de los genotipos disminuyeron para HM y FT, mientras que los de HT24 y RTF aumentaron en los genotipos conforme la SMV avanzaba en ciclos de selección, mientras que la variable HN no tuvo efecto estadístico.

Por otra parte, la variable HN correlacionó con PMS ($r = -0.53^{**}$) y con HM ($r = 0.48^{**}$), mientras que HT24 estuvo correlacionada con REN y PMS ($r = 0.33^*$ y -0.30^* , respectivamente), en tanto el RTF correlacionó con las variables REN, PMS, HN, HM y HT24 ($r = 0.32^*$, -0.30^* , 0.47^{**} , 0.36^{**} y 0.57^{**} , respectivamente); por último la variable FT también correlacionó con REN, PR, HN, HM y RTF ($r = -0.42^{**}$, 0.50^{**} , -0.78^{**} , -0.53^{**} y -0.59^{**} , respectivamente) (Cuadro 3.3). La correlación nos indica la significancia y la relación positiva o negativa existentes entre las variables.

En la Figura 3.1D de la variable humedad de nixtamal (HN) se observa que en el mega-ambiente del genotipo C0, sólo M 2013-PV discriminó entre genotipos, mientras que T 2014-PV lo hizo para el mega-ambiente de C19, lo cual indica que estas localidades tuvieron como mejor material respectivamente a tales genotipos, quedando T 2013-PV por tanto como el más estable. Los vectores de los ambientes fueron $< 90^\circ$ en cada mega-ambiente, pero entre los ambientes de cada mega-ambiente fueron $> 90^\circ$, lo cual indica que los ambientes de cada mega-ambiente no guardan relación en la forma de ordenar a los genotipos (Yan *et al.*, 2000). La distribución de los ambientes en HN se debió al manejo agronómico y condiciones edafoclimáticas (Cuadro 3.1), variable muy sensible a estos factores (Vázquez *et al.*, 2016).

Los resultados de HN en este trabajo coinciden con los de Salinas y Aguilar (2010), al no existir significancia estadística entre la dureza del endospermo de genotipos. Por otra parte, Vázquez *et al.* (2012b) y Vázquez *et al.* (2016) encontraron valores muy idénticos a los de los genotipos y ambientes para HN; esto está en relación a que en ambos estudios se utilizaron

las mismas y/o cercanas localidades de Valles Altos. Por otro lado, resultados similares se observaron para el Estado de Veracruz por Salinas *et al.* (2010) y Sierra-Marcial *et al.* (2010). Por su localización (Figura 3.1D), M 2014-PV tuvo los valores más altos (52.7 %) en HN, donde se produjeron uno de los dos rendimiento más altos. Los resultados discrepan con Vázquez *et al.* (2010), quienes reportaron 45.1 % de HN para variedades de la raza Tuxpeño en el Estado de Hidalgo, perteneciente a Valles Altos. De acuerdo con el Cuadro 3.3, ningún genotipo y ambiente cumple con los requisitos demandados por las industrias procesadoras, excepto T 2014-PV para la IMT, el cual discrimina entre genotipos, ubicándose en el mega-ambiente de C19 que podría ser el genotipo ideal para HN, ya que cuenta con otras características apropiadas para las industrias procesadoras.

Por lo que respecta a la Figura 3.1E de la variable humedad de masa (HM), el mega-ambiente de C14 contó con dos ambientes, pero solo C 2014-PV discriminó entre genotipos, mientras que el mega-ambiente de C19 solo tuvo el ambiente T 2014-PV (el más estable) que no discriminó, ambientes que por su localización fueron los de menor HM, igual que en HN. En tanto, el mega-ambiente de C0 tuvo tres ambientes, de los cuales, solo M 2014-PV y T 2014-OI (el de mejor adaptación) discriminaron entre genotipos, teniendo un ángulo de 180° entre los vectores de los ambientes T 2014-PV y T 2014-OI, lo cual ordena de manera opuesta a los genotipos (Yan *et al.*, 2000), dificultando la selección por ser tan contrastantes. En tanto, los otros cuatro ambientes fueron < 90° en relación con el ambiente T 2014-OI, es decir, ordenó a los genotipos de manera semejante, sucediendo lo contrario con T 2014-PV.

Para la elaboración de una buena tortilla, se debe considerar un grano que favorezca la alta humedad, extensibilidad y una buena textura de masa entre otros atributos (Arámbula-Villa *et al.*, 2001). En este sentido C0 y M 2014-PV fueron los más aptos para la HM, ya que tuvieron los promedios más elevados (Cuadro 3.3). Las diferencias entre genotipos pueden atribuirse a los diferentes grados de dureza del endospermo, ya que los granos de textura suave, como los

de C0, tienden a una alta HM, tal como lo reportó Vázquez *et al.* (2010). Los resultados de esta variable discrepan de los encontrados por Antuna *et al.* (2008) para HM con respecto a variedades de la raza Tuxpeño (55.5 %), evaluadas en el Estado de Michoacán a 1 300 m de altitud, teniendo mayor similitud con lo reportado por Vázquez *et al.* (2010) para la misma raza (58.5 %) evaluada en el Estado de Hidalgo a 2 105 m, perteneciente a Valles Altos, lo que hace suponer que el genotipo V-520C de Veracruz (C0), a través de los años (C14 y C19), tiende a tener características de la zona de adaptación. Por otro lado, Arámbula *et al.* (2000) concluyeron que la mejor HM para elaboración de tortillas debe estar entre 50 y 58 %, lo que indica que ningún promedio de genotipo y ambientes estuvo dentro de estos parámetros, excepto el T 2013 y T 2014-PV, siendo este último el más estable en el mega-ambiente de C19, lo cual por su localización y menor promedio podría ser el mejor genotipo para esta variable.

La Figura 3.1F correspondiente a la humedad de tortilla a las 24 horas (HT24), explica que en el mega-ambiente del genotipo C0 solo el ambiente C 2014-PV 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 M 2013-PV, M 2014-PV y T 2014-OI se localizaron en la parte extrema derecha del biplot, donde se encuentran los más altos promedios (Cuadro 3.3). Ningún ambiente correspondió al mega-ambiente de C14, siendo T 2014-PV el más estable. Esta variable está estrechamente relacionada con REN (positivo) y con PMS (negativo), tal como lo indica el análisis de correlación antes mencionado.

Los resultados para humedad de tortilla a 24 horas (HT24), coinciden con los observados por Zepeda *et al.* (2007) y Salinas *et al.* (2010) para la humedad de tortilla tomada a las dos horas después de elaboradas, pues hubo significancia entre los genotipos y entre los ambientes para

HT24 (Cuadro 3.2), pero se encontró una relación opuesta con respecto a la dureza del endospermo en la HT24 considerado por Salinas y Aguilar (2010). En cambio, los resultados de la humedad de tortilla a las dos horas se ajustan a la HT24, coincidiendo con los valores para variedades de la raza Tuxpeño (42 %) reportados por Vázquez *et al.* (2010), lo que confirma una vez más la afinidad entre el material adaptado (C19) con los locales de Valles Altos, tal como lo reportaron Pérez *et al.* (2000; 2002; 2007) en tal raza con caracteres morfológicos.

La Figura 3.1H correspondiente a el 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 localizado en el mega-ambiente de C0 (Cuadro 3.3). En contra parte, los cinco ambientes restantes correspondieron a 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 las variables de humedad (HN, HM y HT24), lo que indica que a mayor humedad el rendimiento de tortillas se eleva.

Los resultados de Valles Altos obtenidos en este trabajo coinciden con los 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 más altos que los aquí encontrados (Cuadro 3.3). RTF es una variable muy sensible a los efectos de la fertilización de nitrógeno y a la humedad (riegos) (Cuadro 3.1), 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 tuvieron valores ligeramente por debajo del RTF demandado por la IMT.

Por último, para la fuerza de rompimiento de la tortilla (FT) (Cuadro 3.3), se observa que el C19 necesitó la menor FT (193.05 g^f). De igual manera, en Montecillo se tuvieron los menores promedios en las dos evaluaciones, los cuales correspondieron al mega-ambiente del genotipo C19 y discriminaron entre genotipos (Figura 3.1I). 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 FT en este trabajo concuerda con lo reportado por Vázquez *et al.* (2016) en las tres fuentes de variación (Cuadro 3.2). Salinas y Aguilar (2010) encontraron que los granos de endospermo duro tienen una menor cantidad de amilosa, molécula responsable de la dureza de la tortilla, lo que pudo dar lugar a los resultados aquí observados. Los maíces con potencial para la elaboración de tortilla se caracterizan por tener valores altos de rendimiento de tortilla, así como baja fuerza de rompimiento de la tortilla (Mauricio *et al.*, 2004). Tanto el genotipo C19, como el ambiente M 2014 mostraron estos dos atributos, además de tener los mejores rendimientos de grano y los más altos porcentajes de HT24 (Cuadro 3.3), tal como lo señaló el análisis de correlación. Los resultados de RTF altos y FT bajos fueron observado en los trabajos de Vázquez *et al.* (2016) en Valles Altos con materiales híbridos, mostrando un comportamiento diferente en las dos variables; sin embargo, son afines con la dureza del endospermo informado por Salinas y Aguilar (2010) con maíces criollos del Estado de Puebla y Tlaxcala.

3.6 CONCLUSIONES

La estabilidad y adaptación en el rendimiento de grano, calidad del nixtamal, masa y tortilla del maíz Tuxpeño (V-520C) sometido a 0 (C0), 14 (C14) y 19 (C19) ciclos de Selección Masal Visual (SMV) en Valles Altos pudo estudiarse de manera adecuada con la gráfica biplot GGE del modelo de sitios de regresión (SREG). Las gráficas permitieron observar que el C19 contó con mejores atributos (estable y de mejor adaptación) que sus ciclos inferiores, tal es el caso de rendimiento de grano (3.54 t ha^{-1}), humedad de tortilla a las 24 horas (42.72 %), rendimiento de tortilla fría (1.44 Kg), así como el menor pericarpio retenido (36.57 %) y fuerza de rompimiento de tortilla (193 g^f). Al mismo tiempo, se pudo observar en cada gráfica que el ambiente de Montecillo 2014-PV tuvo una gran afinidad con C19, discriminando entre genotipos y teniendo los mejores promedios en: rendimiento de grano (3.56 t ha^{-1}), humedad de nixtamal (52.75 %), humedad de masa (61.99 %), humedad de tortilla a las 24 horas (43.22 %), rendimiento de tortilla fría (1.48 Kg) y menor fuerza de rompimiento de la tortilla (162.66 g^f). En tanto, para pérdida de materia seca, C19 y Montecillo 2014-PV fueron los segundos mejores, cumpliendo con la NMX-034/1 ($\leq 5\%$). La SMV produjo cambios favorables en el C19, el cual tuvo mayor adaptación y estabilidad entre ambientes para las variables de rendimiento de grano, calidad del nixtamal, masa y tortilla. Por último, los tres genotipos cumplieron con las normas de las industrias procesadoras para la pérdida de materia seca ($\leq 5\%$) y también con el pericarpio retenido ($\geq 30\%$) para la industria de masa y tortilla, mientras en la misma industria, solo el ambiente de Tepetates 2014-PV cumplió para humedad de nixtamal (45-48%).

3.7 LITERATURA CITADA

Almeida-Domínguez, H. D.; Suhendro, E. L. y Rooney, L.W. 1997. Corn alkaline cooking properties related to grain characteristics and viscosity. *Journal of Food Science*. 62(3): 516-519.

- American Association of Cereal Chemists (AACC). 2000. Approved Methods of the AACC. 16th Ed. AACC. The Association. St. Paul, MN. USA. 1200 p.
- 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. *Fitotecnia Mexicana*. 1(3): 23-27.
- Aragón, C. F.; Taba, S.; Hernández, C. J. M.; Figueroa, C. J. de D. y Serrano, A. V. 2006. Actualización sobre maíces criollos de Oaxaca. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Informe final SNIB. CONABIO proyecto Núm. CS002, México D.F. 119 p.
- Arámbula, V. G.; Yáñez, L. J. M.; Vorobiev, Y. y González, H. J. 2000. Coeficiente efectivo de difusión de agua en masas de maíz nixtamalizado por extrusión. *Agrociencia*. 34: 717-727.
- Arámbula-Villa, G.; González-Hernández, J. and Ordorica-Falomir, C. A. 2001. Physicochemical, structural and textural properties of tortillas from extruded instant corn flour supplemented with various types of corn lipids. *Journal of Cereal Science*. 33: 245-252.
- Castillo, D.; Matus, I.; del Pozo, A.; Madariaga, R. and Mellado, M. 2012. Adaptability and genotype \times environment interaction of spring wheat cultivars in Chile using regression analysis, AMMI, and SREG. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 72(2): 167-174.
- Castillo, G. F. 1993. La variabilidad genética y el mejoramiento de los cultivos. *Ciencia (número especial)* 44: 69-79.
- Crossa, J. 1990. Statistical analysis of multilocation trials. *Advances in Agronomy*. 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. *Agronomy Journal*. 107(2): 736-747.

Figuroa, 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. *Archivo Latinoamericano de Nutrición*. 51(3): 293-302.

García, E. 1973. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Instituto de Geografía (2° edición). Universidad Nacional Autónoma de México. México. D. F. 246 p.

Kandus, M.; Almorza, D.; Ronceros, R. B. and Salerno, J. C. 2010. Statistical models for evaluating the genotype-environment interaction in maize (*Zea mays* L.). *Phyton-International Journal of Experimental Botany*. 79: 39-46.

Ibáñez, M. A.; Cavanagh, M. M.; Bonamico, N. C.; Di Renzo, M. A. 2006. Análisis gráfico mediante biplot del comportamiento de híbridos de maíz. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. 35(3): 83-93.

Márquez-Sánchez, F. 2008. De las variedades criollas de maíz (*Zea mays* L.) a los híbridos transgénicos. I: Recolección de germoplasma y variedades mejoradas. *Agricultura, sociedad y desarrollo*. 5(2): 151-166.

Martínez, G. A. 1988. *Diseños Experimentales. Métodos y Elementos de Teoría*. Trillas, México. 756 p.

Mauricio, S. R. A.; Figuroa, J. D.; Taba, S.; Reyes, M. L.; Rincón, F. y Mendoza, A. 2004. Caracterización de accesiones de maíz por calidad de grano y tortilla. *Fitotecnia Mexicana*. 27: 213-222.

Molina, G. J. D. 1983. *Selección Masal Visual Estratificada en Maíz*. Publicación Especial. Centro de Genética, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 36 p.

Norma Mexicana para Maíces Destinados al Proceso de Nixtamalización (NMX-FF034-2002-SCFI-Parte-1). 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. México, D. F. 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: 533-542.

Pérez, C. 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. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 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.

Preciado, O. R.; Guerrero, R.; Ortega, C. A.; Terrón, A.; Crossa, J.; Córdova, S. A.; Reyes, C.; Aguilar, G.; Tut, C.; Gómez, N. and Cervantes, E. 2006. Identification of superior quality protein maize hybrids for different mega-environments using the biplot methodology. *Maydica*. 51: 451-460.

Salazar-Martínez, J.; Rivera-Figueroa, C. H.; Arévalo-Gallegos, S.; Guevara-Escobar, A.; Malda-Barrera, G. y Rascón-Cruz, Q. Calidad del nixtamal y su relación con el ambiente de cultivo del maíz. *Fitotecnia mexicana*. 38(1): 67-73.

Salinas, M. Y. y Vázquez, C. G. 2006. Metodologías de Análisis de la Calidad Nixtamalero-Tortillera en Maíz. Folleto Técnico No. 23. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valle de México. Chapingo, Edo de México. México. 91 p.

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. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*. 2(1): 5-11.

Salinas, M. Y.; Gómez, M. N. O.; Cervantes, M. J. E.; Sierra, M. M.; Palafox, C. A.; Betanzols, M. E. y Coutiño, B. E. 2010. Calidad nixtamalera y tortillera en maíces del trópico húmedo y sub-húmedo de México. *Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 1(4): 509-523.

Samonte, S. O. P. B.; Wilson, L. T.; McClung, A. M. and Medley, J. C. 2005. Targeting cultivars onto rice growing environments using AMMI and SREG GGE biplot analyses. *Crop Science*. 45: 2414-2424.

Sánchez, G. J. J.; Goodman, M. M. and Stuber, C. W. 2000. Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of México. *Economic Botany*. 54: 43-59.

SAS, Statistical Analysis System. 2002. *The SAS System for Windows 9.0. User's guide*. Cary, N. C. USA. 584 p.

Secretaría de economía (SE). 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 (Noviembre 2014)

Setimela, P. S.; Crossa, J. and Bänziger, M. 2010. Targeting of early to intermediate maize hybrids for yield performance and yield stability using SREG model. *South African Journal of Plant and Soil*. 7(3): 207-214.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (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. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalSinPrograma.do (Noviembre 2016).

- Sierra-Macías, M.; Palafox-Caballero, A.; Vázquez-Carrillo, G.; Rodríguez-Montalvo, F. y Espinosa-Calderón, A. 2010. Caracterización agronómica, calidad industrial y nutricional de maíz para el trópico mexicano. *Agronomía mesoamericana*. 21(1): 21-29.
- Vázquez, C. M. G.; Pérez, C. J. P.; Hernández, C. J. M.; Marrufo, D. M. de la L. y Martínez, R. E. 2010. Calidad de grano y de tortillas de maíces criollos del altiplano y valle del mezquital, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 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, A. C. 2012a. Interacción genotipo-ambiente del rendimiento y calidad de grano y tortilla de híbridos de maíz en valles altos de Tlaxcala, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 35(3): 229-237.
- Vázquez, C. M. G.; Mejía, A. H.; Tut, C. C. y Gómez, M. N. 2012b. Características de granos y tortillas de maíces de alta calidad proteínica desarrollados para los Valles Altos centrales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 35(1): 23-31.
- 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. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 38(1): 75-83.
- 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 Science*. 56: 3090–3099.
- 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.
- Yan, W.; Hunt, L. A.; Sheng, Q. and Szlavnic, Z. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on GGE biplot. *Crop Science*. 40: 597-605.

- Yan, W.; Cornelius, P. L.; Crossa, J. and Hunt, L. A. 2001. Two types of GGE Biplots for analyzing multi-environment trial data. *Crop Science*. 41: 656-663.
- Yan, W. and Rajcan, I. 2002. Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Science*. 42(1): 11-20.
- Yan, W.; Kang M. S.; Ma, B.; Woods, S. and Cornelius, P. L. 2007. GGE biplot vs AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science*. 47: 643-655.
- 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.
- 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. *Agricultura Técnica en México*. 33(1): 17-24.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES GENERALES

Mediante los análisis de los modelos AMMI (efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas) y SREG (sitios de regresión), se pudo dimensionar la estabilidad y la adaptación de los genotipos de la variedad V-520C en los ambientes evaluados. La Selección Masal Visual (SMV) realizada en Valles Altos Centrales al maíz V-520C (C0) de la raza Tuxpeño durante 14 (C14) y 19 (C19) ciclos “año con año” tuvo efectos significativos. El genotipo C19 (con más ciclos de SMV) mostró mayor adaptación y estabilidad que sus ciclos anteriores, además tuvo cambios notables en el rendimiento de grano, variables morfológicas, de calidad de grano, nixtamal, masa y tortilla. Tales características fueron favorables para las industrias de la masa-tortilla. Así mismo, se pudo observar que el ambiente de Montecillo en los años 2013 y 2014 Primavera-Verano (localidad de Valles Altos y lugar donde se realizó la SMV) tuvieron una gran afinidad con el comportamiento de C19, resultando el ambiente y el genotipo con el mayor rendimiento (3.5 t ha^{-1}) y características morfológicas idóneas, así como una buena calidad de grano, de nixtamal, masa y tortilla que hacen notar la trascendencia, bondad y magnitud de la SMV para adaptación de maíz tropical en Valles Altos.

El modelo AMMI reveló que el ambiente de Montecillo 2013 y 2014 Primavera-Verano, resultaron favorables en la adaptación y estabilidad para el mejoramiento de la productividad y calidad de grano del maíz C19, con respecto al C0. Por tanto, se infiere que la SMV en el genotipo C19 contribuyó a aumentar la productividad y disponer de un grano con calidad para la industria de la masa y la tortilla. Las características evaluadas: índice de flotación de 33 %, correspondiente a granos duros, peso hectolítrico de 74.8 kg hL^{-1} , porcentaje de pericarpio de 6.36 % y porcentaje de germen de 10.6 %, cumplieron con lo establecido por la

norma NMX-034(1), para el genotipo C19 con el mejor rendimiento (3.5 t ha⁻¹) y el cual puede ser destinado al proceso de nixtamalización tradicional.

Los resultados de los análisis de varianza combinado de ambientes e individuales de Valles Altos y de Veracruz indicaron que el maíz Tuxpeño V-520C (C14 y C19) experimentó cambios adaptativos por efecto de la SMV, selección que se llevó a cabo en Valles Altos “año con año”. La SMV tuvo efectos favorables en el C19, pues este genotipo además de tener el mejor rendimiento, redujo los días a las floración, la altura de planta, el número de hojas totales y el tamaño de la espiga, e incrementó el número de ramas primarias de la espiga y los componentes de rendimiento (caracteres de la mazorca), manteniéndose todos estos cambios en los seis ambiente donde fue evaluado. Sin embargo el CU (compuesto universal de la raza Chalqueño) fue superior en rendimiento al C19 en Valles Altos a pesar de los 19 años con SMV recurrente, esto por ser el materia original y local de esta zona, además de ser muy precoz esto debido a que cuenta con pocas ramificaciones de espiga y poca emisión de estigma, característico de esta raza.

Las gráficas biplot GGE del modelo SREG detectaron al C19 como el material con mayor adaptación y estabilidad en el rendimiento de grano, lo que también se demostró en variables de calidad de nixtamal, masa y tortilla. Al mismo tiempo, se pudo demostrar que el ambiente de Montecillo 2014 Primavera-Verano tuvo mayor afinidad con el comportamiento de C19, discriminando entre genotipos y localizándose en su mega-ambiente del genotipo, así como los seis ambientes. De acuerdo con los resultados, la SMV pudo indirectamente hacer cambios favorables en la calidad de nixtamal, masa y tortilla mientras se avanzaba con el rendimiento de grano y la adaptación.