



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN**

**EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

**PRODUCCIÓN DE SEMILLAS**

**ESTABILIDAD DE RENDIMIENTO Y CALIDAD DE SEMILLA DE  
PROGENITORES DE HÍBRIDOS DE MAÍZ EN  
VALLES ALTOS DE MÉXICO**

**ROCIO EDELMIRA HERNÁNDEZ CALDERA**

**T E S I S**

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

**DOCTORA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

**2018**



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

## CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe, "**Rocio Edelmira Hernández Caldera**", Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor "**Dr. Gabino García De los Santos**", por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis "**Estabilidad del rendimiento y calidad de semilla de progenitores de híbridos de maíz en Valle Altos de México**", y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 10 de enero de 2018.

Rocio E. Hernández

Alumna Rocio Edelmira Hernández Caldera

[Firma]

Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

**SEMILLA DE PROGENITORES DE HÍBRIDOS DE MAÍZ EN VALLES ALTOS DE MÉXICO**, realizada por la alumna: **Rocio Edelmira Hernández Caldera**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTORA EN CIENCIAS**  
**RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**  
**PRODUCCIÓN DE SEMILLAS**

**CONSEJO PARTICULAR**

**CONSEJERO**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. GABINO GARCÍA DE LOS SANTOS**

**ASESORA**

  
\_\_\_\_\_  
**DRA. ROSALBA ZEPEDA BAUTISTA**

**ASESOR**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. MIGUEL ÁNGEL ÁVILA PERCHES**

**ASESOR**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. JOSÉ LUIS ARELLANO VÁZQUEZ**

**ASESORA**

  
\_\_\_\_\_  
**DRA. ELIZABETH GONZÁLEZ ESTRADA**

Montecillo, Texcoco, Estado de México, enero de 2018.

**ESTABILIDAD DE RENDIMIENTO Y CALIDAD DE SEMILLA DE  
PROGENITORES DE HÍBRIDOS DE MAÍZ EN VALLES ALTOS DE  
MÉXICO**

**Rocio Edelmira Hernández Caldera, Dra.  
Colegio de Postgraduados, 2018**

**RESUMEN**

Para evaluar la estabilidad del rendimiento, calidad física y fisiológica de líneas y cruzas simples progenitoras de híbridos trilineales de maíz (*Zea mays* L.) e identificar localidades alternativas a la región de Valles Altos Centrales para la producción de semilla de calidad; así como, identificar características asociadas al rendimiento, se establecieron experimentos durante el ciclo primavera-verano 2014 y 2015, se evaluaron 15 genotipos: nueve líneas, tres cruzas simples y tres híbridos trilineales en tres localidades: Coatlinchán (COA), Celaya (CEL) y San Luis de la Paz (SLP), México en un diseño de bloques completos al azar. Los resultados indican que los progenitores M-43xM-44 (5.2 t ha<sup>-1</sup>), M-55 (2.7 t ha<sup>-1</sup>), M-52 (2.2 t ha<sup>-1</sup>), M-54 (0.9 t ha<sup>-1</sup>) y el híbrido H-66 (6.6 t ha<sup>-1</sup>) fueron estables en rendimiento, siendo idóneos por que presentaron mayor rendimiento en comparación con el resto de los progenitores evaluados. La línea M-48 mostró adaptación específica al ambiente CEL y la M-47xM-46 a SLP. En H-66, la sincronía de la floración tuvo un día de diferencia; M-43xM-44 (2.4 m) y la línea M-43 (2.1 m) presentaron mayor altura de planta y un rendimiento de 5.2 y 2.4 t ha<sup>-1</sup> respectivamente. Las condiciones ambientales influyeron en la respuesta de calidad física y fisiológica de los materiales, para la expresión de la calidad física los mejores ambientes fueron SLP 2014 en peso de mil semillas (295.3 g), COA 2015 en peso hectolítrico (74.7 kg hL<sup>-1</sup>), COA 2014 y SLP 2014 en porcentaje de semilla comercial (76.0 y 73.3 %). Para calidad fisiológica y específicamente en germinación estándar, todos los ambientes fueron estadísticamente iguales a excepción de CEL 2014 y en condiciones de germinación en

estrés por bajas temperaturas, SLP 2015 (82 %) fue el mejor ambiente. El progenitor M-47xM-46 presentó estabilidad en calidad física y la M-43xM-44 en calidad fisiológica. Entre los híbridos, H-70 en general presentó la mejor respuesta para calidad física y fisiológica; sin embargo, se comportó como un híbrido poco predecible, con mejor respuesta a ambientes favorables. Con respecto a la correlación de los caracteres agronómicos de importancia asociados al rendimiento, destacaron la longitud de mazorca y el número de granos por hilera; peso seco de plántula en germinación estándar y en la prueba fría; así como, la germinación en la prueba fría para caracteres de calidad física y fisiológica. Estos resultados sugieren a San Luis de la Paz y Celaya como localidades con características aptas para la producción de semilla con calidad de progenitores de híbridos de maíz de Valles Altos de México; y a los caracteres longitud de mazorca, número de granos por hilera, peso seco de plántula en la prueba de germinación estándar, peso seco de plántula y germinación en la prueba fría como criterios de selección indirecta relacionados con el rendimiento en la calidad física y fisiológica de semilla de maíz. Por lo que se logró identificar progenitores de híbridos trilineales estables en rendimiento y calidad, y ambientes alternativos de producción de semilla de maíz para los Valles Altos de México.

**Palabras clave:** genotipos, ambientes, IGA, características agronómicas y de calidad, correlación

# **YIELD STABILITY AND SEED QUALITY OF HYBRID MAIZE PARENTS IN HIGH VALLEYS OF MEXICO**

**Rocio Edelmira Hernández Caldera, Dra.  
Colegio de Postgraduados, 2018**

## **ABSTRACT**

In order to evaluate the yield stability, and physical and physiological quality of lines and simple crosses that parent tri-lineal maize (*Zea mays* L.) hybrids, and identify alternative locations for seed increase and production in the High Central Valleys of Mexico, as well as to identify characteristics associated with yield, experiments were established during the spring-summer cycle 2014 and 2015, 15 genotypes: nine lines, three simple crosses, and three tri-lineal hybrids were evaluated in three locations: Coatlinchán (COA), Celaya (CEL), and San Luis de la Paz (SLP), in a completely randomized block design. The results indicate that the parents M-43xM-44 (5.2 t ha<sup>-1</sup>), M-55 (2.7 t ha<sup>-1</sup>), M-52 (2.2 t ha<sup>-1</sup>), M-54 (0.9 t ha<sup>-1</sup>), and the hybrid H-66 (6.6 t ha<sup>-1</sup>) were stable in yield, being ideal since they showed higher yields than the rest of the evaluated parents. The M-48 line showed specific adaptation to the CEL environment, while the M-47xM-46 did so for the SLP environment. In H-66, flowering synchronicity had one-day difference. M-43xM-44 (2.4 m) and the M-43 (2.1 m) had the greatest plant height and yields of 5.2 and 2.4 t ha<sup>-1</sup>, respectively. The environmental conditions influenced the responses of physical and physiological quality of the materials; the best environments for the expression of physical quality were SLP 2014 with regard to weight per thousand seeds (295.3 g), COA 2015 with regard to hectoliter weight (74.7 kg hL<sup>-1</sup>), COA 2014 and SLP 2014 with regard to percentage of commercial seeds (76.0 and 73.3 %). In the case of physiological quality, specifically standard germination, all the environments were statistically equal, with the exception of CEL 2014, while under low-temperature stress

germination conditions; SLP 2015 (82%) was the best environment. The M-47xM-46 parent showed physical quality stability, while the M-43xM-44 parent showed physiological quality stability. Between hybrids, H-70 generally presented the best response in physical and physiological response; however, it was an unpredictable hybrid, with better response to favorable environments. With regard to the correlation of important agronomical characteristics associated with yield, ear length and number of kernels per row, dry weight of seedlings in standard and cold test germination, and cold test germination in physical and physiological quality stood out. These results suggest San Luis de la Paz and Celaya as alternative locations with favorable characteristics for maize seed production with quality parents in the High Valleys of Mexico; they also suggest ear length, number of kernels per row, dry weight of seedling in standard germination, dry weight of seedling and germination in the cold test as indirect selection criteria related with yield in physical and physiological quality of maize seeds. So it was possible to identify progenitors of stable trilinear hybrids in yield and quality, and alternative environments of corn seed production for the High Valleys of Mexico.

**Key words:** genotypes, environments, IGA, agronomic and quality characteristics, correlation

## DEDICATORIA

*A Dios con todo mi amor por brindarme la vida, mi familia, familiares, amigos y por inspirar mi espíritu para la realización de este estudio, por darme salud y bendición para alcanzar mis metas como persona y como profesional.*

Con mucho cariño y amor a **Allen, Paco y Ángel** por darme dicha y felicidad, espero que en un futuro puedan vivir una experiencia similar.

A mi esposo **Gustavo** por todo su amor y apoyo en esta etapa de mi vida.

A mis padres **Ezequiel y Ángela** con mucho cariño, respeto y amor por ser un gran ejemplo y motivación en mi vida para seguir superándome, por toda su confianza y amor incondicional.

A mis hermanas (os): **Xóchitl Yadira, Sonia Elizabeth, Irma, Imelda, Rosalba, José Luís, Misael y Ezequiel** por todos sus consejos, apoyo, comprensión y amor.

A mis **sobrinos** (as) con todo mi amor por todas las satisfacciones que me han brindado.

A mis **familiares** indirectos que han sido un pilar y me han apoyado incondicionalmente en esta etapa de mi vida, muchas gracias por todo su cariño, trabajo y esfuerzo.

A todos mis **amigos y amigas** por todo su apoyo, y los momentos de alegría y felicidad compartidos, pero muy en especial por su amistad y cariño.

A todos mis **profesores** por motivarme a seguir superándome profesionalmente.

A todas las **personas** que me han apoyado para cumplir esta etapa en mi vida.



## AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el apoyo en el financiamiento de mis estudios de Doctorado.

Al **Colegio de Postgraduados, Programa en Recursos Genéticos y Productividad-Producción de Semillas** por permitirme continuar con mi formación como profesionista.

Al **Programa de Producción de Semillas del CEVAMEX y CEBAJ del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias**, a través de los Proyectos “Generación de tecnología para la producción de semilla de maíz y su transferencia a empresas semilleras en el Centro de México” e “Impulso a la innovación de maíz en Valles Altos y Zona de Transición de México”, por proporcionarme el proyecto de investigación y brindarme todas las facilidades financieras, técnicas y de campo para desarrollar la Tesis.

A los integrantes del Consejo Particular **Dres. Gabino García de los Santos, Rosalba Zepeda Bautista, Miguel Ángel Ávila Perches, José Luis Arellano Vázquez y Elizabeth González Estrada** por su apoyo en el fortalecimiento de mi formación académica, por la oportunidad de poder trabajar con Ustedes, por su paciencia, apoyo, disposición, tiempo, pero en especial por su amistad y dedicación a la investigación y contribuciones a la Tesis.

Al **M.C. Juan Virgen Vargas y Dr. Miguel Ángel Ávila Perches** por todo su apoyo y motivación para realizar la investigación de tesis pero en especial por su paciencia, tiempo, consejos y amistad.

Al **Dr. Aquiles Carballo Carballo** por formar parte del comité como sinodal, por sus consejos y amistad brindada.

Al **Dr. Alfredo Josué Gámez Vásquez** por todo su tiempo, apoyo, motivación pero sobre todo por su amistad.

Al **personal de los laboratorios de Análisis de semilla** del Colegio de Postgraduados y del Programa de producción de semillas del CEVAMEX y CEBAJ.

Al grupo de **académicos que forman el Programa en Recursos Genéticos y Productividad. Producción de Semillas y Genética** por los conocimientos brindados pero sobre todo por su cariño y amistad.

Al **Ph. D. Martin Entz** y su equipo de trabajo por permitirme realizar una Estancia Profesional Doctoral en el Department of Plant Science, University of Manitoba en Winnipeg, Manitoba, Canada, y participar en los proyectos de investigación de Participatory plant breeding y Participatory conventional breeding contribuyendo a fortalecer mi formación académica.

## CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	xiv
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xvii
<b>INTRODUCCIÓN GENERAL</b> .....	1
1. Objetivos .....	8
2. Hipótesis .....	8
3. Literatura citada .....	9
<b>CAPÍTULO I. ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO DE SEMILLA DE LÍNEAS Y CRUZAS SIMPLES PROGENITORAS DE HÍBRIDOS TRILINEALES DE MAÍZ</b> .....	18
1.1 RESUMEN .....	18
1.2 ABSTRACT .....	20
1.3 INTRODUCCIÓN .....	21
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	22
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	27
1.5.1 Condiciones climáticas de los ambientes de prueba.....	27
1.5.2 Análisis de varianza combinado y comparación de medias .....	30
1.5.3 Estabilidad e interacción genotipo ambiente .....	36
1.6 CONCLUSIONES.....	40
1.7 LITERATURA CITADA.....	41

**CAPÍTULO II. INTERACCIÓN GENOTIPO AMBIENTE EN LA CALIDAD FÍSICA Y FISIOLÓGICA DE SEMILLAS DE PROGENITORES E HÍBRIDOS DE MAÍZ..... 47**

2.1 RESUMEN .....	47
2.2 ABSTRACT .....	49
2.3 INTRODUCCIÓN .....	51
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	52
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	57
2.5.1 Condiciones climáticas de los ambientes de prueba.....	57
2.5.2 Análisis de varianza combinado y comparación de medias .....	58
2.5.3 Estabilidad e interacción genotipo ambiente .....	67
2.6 CONCLUSIONES.....	72
2.7 LITERATURA CITADA .....	73

**CAPÍTULO III. CALIDAD FÍSICA Y FISIOLÓGICA DE SEMILLA DE MAÍZ Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES.....79**

3.1 RESUMEN .....	79
3.2 ABSTRACT .....	81
3.3 INTRODUCCIÓN .....	83
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	86
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	91
3.5.1 Relación entre rendimiento y características agronómicas, de calidad física y fisiológica.....	93
Análisis de correlación de Pearson. ....	93

Análisis de componentes principales .....	94
Correlaciones canónicas entre caracteres agronómicos y de calidad de semilla .....	100
3.6 CONCLUSIONES .....	105
3.7 LITERATURA CITADA .....	105
<b>CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN GENERAL</b> .....	111
4.1 Estabilidad del rendimiento de semilla de líneas y cruzas simples progenitoras de híbridos trilineales de maíz .....	113
4.2 Interacción genotipo ambiente en la calidad física y fisiológica de semilla de progenitores de híbridos de maíz.....	116
4.3 Calidad física y fisiológica de maíz y su relación con el rendimiento y sus componentes .....	119
4.4 Literatura citada .....	121
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES</b> .....	127

## LISTA DE CUADROS

### CAPÍTULO I. ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO DE SEMILLA DE LÍNEAS Y CRUZAS SIMPLES PROGENITORAS DE HÍBRIDOS TRILINEALES DE MAÍZ

	<b>Página</b>
Cuadro 1.1	Genealogía de genotipos de maíz evaluados en cinco ambientes en el Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.....24
Cuadro 1.2	Localidades de evaluación, localización geográfica y fechas de siembra de progenitores e híbridos trilineales de maíz. Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.....24
Cuadro 1.3	Análisis químico de suelo de las localidades de evaluación de progenitores e híbridos trilineales de maíz. Estado de México y Guanajuato, México. 2014.....25
Cuadro 1.4	Precipitación pluvial de los cinco ambientes de evaluación de progenitores e híbridos trilineales de maíz. Estado de México y Guanajuato.2014-2015.....28
Cuadro 1.5	Cuadros medios del análisis de varianza combinado para variables agronómicas de progenitores e híbridos de maíz evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.....31
Cuadro 1.6	Prueba de medias entre los ambientes de evaluación para variables agronómicas de progenitores e híbridos de maíz en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.....32
Cuadro 1.7	Comparación de variables agronómicas de progenitores e híbridos de maíz evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.....35
Cuadro 1.8	Prueba de Gollob del modelo SREG, para el rendimiento de progenitores e híbridos evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015 .....37

## **CAPÍTULO II. INTERACCIÓN GENOTIPO AMBIENTE EN LA CALIDAD FÍSICA Y FISIOLÓGICA DE SEMILLAS DE PROGENITORES E HÍBRIDOS DE MAÍZ**

Cuadro 2.1	Cuadros medios del análisis de varianza combinado y de los componentes principales del modelo SREG para las variables de calidad física y fisiológica de progenitores e híbridos de maíz evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.....	60
Cuadro 2.2	Prueba de medias entre los ambientes de evaluación para variables de calidad física y fisiológica de progenitores e híbridos de maíz evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.....	62
Cuadro 2.3	Comparación de variables de calidad física y fisiológica de progenitores e híbridos de maíz evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.....	65

## **CAPÍTULO III. CALIDAD FÍSICA Y FISIOLÓGICA DE SEMILLA DE MAÍZ Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES**

Cuadro 3.1	Estadísticas básicas para el análisis de las variables agronómicas, de rendimiento, calidad física y fisiológica para estimar el rendimiento en progenitores e híbridos de maíz. 2014-2015.....	92
Cuadro 3.2	Matriz de coeficientes de correlación simple (r) de las variables agronómicas de calidad física y fisiológica de progenitores e híbridos de maíz. 2014-2015.....	95
Cuadro 3.3	Análisis de componentes principales de las variables de calidad física y fisiológica de semilla de maíz. Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.....	98
Cuadro 3.4	Correlaciones canónicas de las variables agronómicas y de calidad de progenitores e híbridos trilineales. Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.....	101

Cuadro 3.5	Correlaciones canónicas dentro de los grupos de variables agronómicas y de calidad de semilla de maíz. Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015 .....	102
Cuadro 3.6	Correlaciones canónicas entre los grupos de variables originales agronómicas y de calidad y de variables de calidad con agronómicas de semilla de maíz. Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.....	103



## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I. ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO DE SEMILLA DE LÍNEAS Y CRUZAS SIMPLES PROGENITORAS DE HÍBRIDOS TRILINEALES DE MAÍZ

#### Página

- Figura 1.1 Temperaturas máximas, medias y mínimas registradas durante el ciclo del crecimiento del cultivo en cinco ambientes. Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.....29
- Figura 1.2 Biplot de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción representada mediante los dos primeros componentes principales del modelo SREG para rendimiento de semilla de progenitores e híbridos evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.....38

### CAPÍTULO II. INTERACCIÓN GENOTIPO AMBIENTE EN LA CALIDAD FÍSICA Y FISIOLÓGICA DE SEMILLAS DE PROGENITORES E HÍBRIDOS DE MAÍZ

- Figura 2.1 Distribución de la precipitación y las temperaturas máximas, medias y mínimas registradas durante el ciclo del crecimiento del cultivo en cinco ambientes. Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015. ....58
- Figura 2.2 Biplots de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción usando los dos primeros componentes principales del modelo SREG para calidad física: peso de mil semillas (a), peso hectolítrico (b) y semilla comercial (c) en la producción de semilla de progenitores e híbridos de maíz evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.....70
- Figura 2.3 Biplots de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción usando los dos primeros componentes principales del modelo SREG porcentaje de germinación estándar (a) y después de prueba fría (b) en la producción de semilla de progenitores e híbridos de maíz evaluados en

cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015 .....71

**CAPÍTULO III. CALIDAD FÍSICA Y FISIOLÓGICA DE SEMILLA DE MAÍZ Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES**

Figura 3.1 Gráfica de sedimentación de variabilidad total de los valores propios (eigenvalor) y de varianza explicada por componente. 2014-2015 .....94

Figura 3.2 Análisis de componentes principales de correlación de variables agronómicas, calidad física y fisiológica en semilla de maíz. 2014-2015..... 100

Figura 3.3 Dispersión de valores de la relación lineal entre las correlaciones canónicas agronómicas<sup>1</sup> y calidad<sup>1</sup>. Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015 ..... 103

## INTRODUCCIÓN GENERAL

La población total en el mundo equivale a más de 7,161 millones de personas, de las cuales 119' 530, 753 habitan en México (1.6 %); por lo que nuestro país se encuentra entre las 11 naciones más pobladas (ONU, 2015). Actualmente, debido al rápido y constante aumento de la población y a la disminución de la productividad agrícola, la población va hacia una crisis alimentaria. Alrededor de 870 millones de personas padecen subnutrición crónica, la mayoría de las cuales viven en países en vías de desarrollo. En un momento en el que se necesita producir más alimentos, el crecimiento de la población humana ha avanzado y ha aumentado la degradación de los recursos a escala masiva (FAO, 2012a). Estudios recientes sugieren que la población necesitará producir entre 70 y 100 % más alimentos para el año 2050 (FAO, 2009; 2012).

La producción de cereales es crucial para el suministro de alimentos, por ser la fuente más importante para el consumo humano directo e indirecto; en el 2016 en el mundo se produjeron 2,607.9 millones de t, con un 42.37 % para la alimentación humana y 34.73 % para la pecuaria (FAO, 2016).

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cereales más importantes en el mundo, se produjeron 1,039 millones de toneladas en 2016, con un rendimiento promedio de 5.2 t ha<sup>-1</sup> (FAO, 2016), proporciona más del 70 % de la ingesta calórica tanto para consumo humano como animal (Setimela *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2016). La composición química del grano es de proteínas 8-11 %, grasas 3-18 %, carbohidratos 72-73 %, fibras 1-2 %, cenizas 1.3 %, calcio 0.19 % y fósforo 0.9 % (FAO, 1993).

En México, el maíz constituye el principal componente de la alimentación, el consumo per cápita es de 130.2 kg/año (FAO, 2016); se producen 28.25 millones de t que equivalen al 2.7 % de la producción mundial, el rendimiento promedio es de 3.8 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2016), inferior al promedio a nivel internacional (5.2 t ha<sup>-1</sup>). Esta producción es insuficiente para abastecer la demanda nacional, por lo que en 2016 se importaron 14.3 millones de t, que representan el 62 % de la producción (FAO, 2016).

El maíz en México se cultiva de 0 hasta 2,700 metros sobre el nivel del mar (msnm); las regiones agroecológicas para la producción son los Valles Altos (2,200-2,700 msnm), Zonas de Transición (1,800-2,200 msnm), Bajío (1,200-1,800 msnm), Trópico húmedo y Cálido seco (0-1,200 msnm) (Gómez-Montiel *et al.*, 2008; Pecina-Martínez *et al.*, 2009; Arellano-Vázquez *et al.*, 2010; Ruiz-Corral *et al.*, 2011).

En el 2016, en los Valles Altos Centrales de México, que se ubican en los estados de Hidalgo, Tlaxcala, México, Puebla, Querétaro, Michoacán, Morelos y la zona agrícola de la Ciudad de México, se establecieron 2.1 millones de hectáreas de maíz (27.2 % de la superficie nacional), con un rendimiento promedio de 2.9 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2016), menor a la media nacional (3.8 t ha<sup>-1</sup>). Estos rendimientos son alarmantes lo que ha ocasionado recurrir a las importaciones de maíz, que han aumentado considerablemente a través de los años, hasta llegar a importar más del 50 % (14.3 millones de t) de la producción de este cultivo (FAO, 2016).

Una alternativa para reducir las importaciones es incrementar la producción de grano de maíz, utilizando semilla certificada, con la adopción de materiales mejorados con alto potencial de rendimiento y cuya semilla tenga calidad (Virgen-Vargas *et al.*, 2016); insumo básico para aumentar la productividad de las especies vegetales (Milošević *et al.*, 2010); ya

que el 80 % de los cultivos económicamente importantes se establecen mediante el uso directo o indirecto de semillas con calidad (Filho, 2015). De la semilla certificada producida en México, aproximadamente el 27 % corresponde a maíz (SNICS, 2016). En 2014 se produjeron 51, 908 t de semilla, cantidad que permite sembrar 2' 595, 400 ha, que constituyen el 33 % de la superficie sembrada de maíz en México (SIAP, 2014). En Valles Altos se siembran 10,276 ha para la producción de semilla, en esta región solo se utiliza semilla certificada en el 6 % de la superficie establecida; concentrándose en las mejores condiciones ambientales (SNICS, 2014). El uso de semilla mejorada, se favorece con el desarrollo de materiales a bajo costo y precio razonable (Espinosa-Calderón *et al.*, 2002) al alcance del productor.

La oferta de la semilla se encuentra concentrada en las seis empresas (Monsanto, Syngenta, Dow AgroScience, Dupont, Bayer, CropSciences y BASF), Dupont y Monsanto representan 56 % de la venta de semilla a nivel mundial (González-Merino y Ávila-Castañeda, 2014). De la semilla que se siembra a nivel nacional el 95 % es producida por empresas internacionales (Monsanto y Pioneer) y el resto por pequeñas empresas nacionales, por lo que es importante promover la participación de empresas nacionales productoras de semilla de maíz a escala local y regional para producir semilla registrada de calidad que permita la obtención de semilla certificada al alcance de los productores (Luna-Mena *et al.*, 2012) y no depender de empresas trasnacionales y así como cubrir las zonas desprotegidas.

De acuerdo a un análisis de 2014 sobre el mercado de semilla mejorada, se encontró que 26 estados del país presentan un déficit de semilla mejorada y los estados de Chiapas,

Puebla, Oaxaca, Veracruz y México presentan un déficit aun mayor, que supera las 10 mil toneladas en cada entidad (García-Salazar y Ramírez-Jaspeado, 2014).

En los países desarrollados en los últimos años se le ha dado gran importancia a la producción de tecnología haciendo uso de la biotecnología moderna (híbridos de maíz transgénico) y al fomento de la protección de este tipo de tecnología a partir del desarrollo de la propiedad intelectual (González-Merino y Ávila-Castañeda, 2014). En México, Turrent-Fernández (2009) menciona que se tienen la capacidad para producir el maíz necesario sin incrementar la superficie y sin hacer uso de maíz transgénico, mediante la aplicación de tecnología de producción, híbridos y prácticas de cultivo disponibles generadas por los centros de investigación y educación pública. Se ha generado tecnología de producción sobre la siembra entre progenitores, de formas de desespigue (Espinosa *et al.*, 2003), densidad de población (Raya-Pérez *et al.*, 2012; Virgen-Vargas *et al.*, 2016), fechas de siembra (Virgen-Vargas *et al.*, 2016) y determinación de cambios en la calidad física, fisiológica en poblaciones hembras y machos (Sánchez-Pérez *et al.*, 2011), efecto del daño de semilla por impacto, envejecimiento (Mancera-Rico *et al.*, 2007), almacenamiento (Virgen-Vargas *et al.*, 2007), calidad física (Pérez-Mendoza *et al.*, 2006) ) y fisiológica de semilla (Goggi *et al.*, 2008).

Virgen-Vargas *et al.* (2016) reportan que algunas instituciones de investigación y enseñanza agrícola como el INIFAP, ofrecen semilla básica y registrada de calidad de progenitores de híbridos, a microempresas nacionales, permitiendo ofertar a un menor precio (50 %) la semilla certificada al productor en Valles Altos, en comparación con las empresas de capital extranjero.

La producción de semilla requiere control de la calidad; entendiendo como calidad de semilla, a la suma de atributos genéticos, físicos, fisiológicos y sanitarios que afectan la

capacidad de las semillas para realizar funciones vitales, relacionadas con la germinación, vigor y la longevidad (Moterle *et al.*, 2011). Sin embargo, existe poca tecnología para la producción de semilla de calidad en las categorías registrada y certificada (Virgen *et al.*, 2013).

La calidad de la semilla es afectada por las condiciones genéticas (G), ambientales (A, bióticas y abióticas) y de interacción genotipo ambiente (IGA); entre las ambientales se encuentran factores climáticos y de tipo nutricional que tienen efecto sobre la expresión del rendimiento, según el genotipo de las plantas (Molina, 1992). Los factores ambientales de mayor influencia son las temperaturas (Abdullah *et al.*, 2001), humedad, fertilidad del suelo, nutrición de la planta madre y la presencia de patógenos (EnayatGholizadeh *et al.*, 2012), aspectos comunes y de mayor efecto en la expresión de los días a floración, maduración y cosecha.

El comportamiento de una variedad está en función del genotipo, del ambiente y de la interacción genotipo ambiente. La IGA, entendida como el comportamiento diferencial que muestran los genotipos a través de condiciones ambientales diversas, lo que causa confusión en la estimación de parámetros genéticos, reduce la respuesta a la selección y dificulta la identificación de genotipos superiores; no obstante, su análisis e interpretación adecuados, permite identificar mega-ambientes, detectar genotipos con adaptabilidad o adaptación específica, proponer estrategias para su mejoramiento genético y para la generación de tecnología apropiada de producción de grano (Rodríguez-Pérez *et al.*, 2002).

La interacción genotipo ambiente se presenta cuando hay respuestas diferentes en los genotipos en relación con la variación del ambiente. La interacción es de gran importancia en la evaluación de híbridos desarrollados para diferentes circunstancias de producción,

entre ambientes y años pueden cambiar la magnitud de la respuesta relativa de los cultivos a ambientes contrastantes (Molina, 1992), por lo que es necesaria la integración de los conceptos de estabilidad para definir la adaptación de cultivos.

Existen varias definiciones de estabilidad y adaptabilidad; Gordon-Mendoza *et al.* (2006) mencionan que la adaptabilidad se refiere a la capacidad de los genotipos de aprovechar ventajosamente los estímulos del ambiente y la estabilidad se refiere a la capacidad de los genotipos de mostrar un comportamiento altamente previsible en función del estímulo ambiental. Becker (1981) menciona que la estabilidad fenotípica puede ser estática (biológica) o dinámica (agronómica); la estática es cuando un genotipo presenta mínima variación a través de los ambientes, mostrando un rendimiento constante en cualquier condición de producción. La dinámica cuando existe una mínima interacción genotipo ambiente, asociada a obtener un incremento del rendimiento en respuesta a mejores condiciones ambientales durante su evaluación, una amplia variedad de ambientes permitirá valorar la estabilidad de los genotipos. La adaptabilidad amplia consiste en que el comportamiento relativo de los genotipos puede clasificarse como favorable bajo gran diversidad de ambientes, y la adaptación específica o local es el comportamiento relativo favorable de un genotipo bajo una gama estrecha de ambientes.

García *et al.* (2009) mencionan que el éxito de cualquier genotipo, depende no sólo de su buen comportamiento en rendimiento de maíz y a la tolerancia que muestre a las principales plagas, sino, además, del desempeño que manifieste en su interacción en los diferentes ambientes de prueba.

Se han propuesto varios modelos estadísticos para estudiar el efecto de la interacción genotipo ambiente y su aprovechamiento positivo en el proceso de desarrollo de variedades (Ahmadi *et al.*, 2012). Los modelos lineales y bilineales para estimar la IGA son



muy útiles y precisos en la visualización de datos multiambientes y de la IGA (Gauch, 2006).

Las técnicas estadísticas que se han utilizado para analizar la IGA, incluyen métodos univariados y multivariados (Crossa *et al.*, 1990). El modelo de regresión por sitios (SREG) y los biplots son herramientas para el análisis e interpretación efectiva de datos con estructura de multiambientes (Yan *et al.*, 2000); el modelo SREG combinado con genotipo (G) e IGA, proporcionan un método científico de análisis visual, llamado "análisis biplot GGE que resume el efecto de G y GE y sirve para la recomendación de cultivos en multiambientes de prueba (Yan, 2001).

En grano de maíz se han realizado diferentes investigaciones sobre estabilidad en rendimiento (Da-Silva *et al.*, 2014), interacción genotipo ambiente de rendimiento (Torres-Flores *et al.*, 2017), características físicas (López-Morales *et al.*, 2017), calidad de tortilla (Vázquez-Carrillo *et al.*, 2012), proteína de grano (Abakemal *et al.*, 2016), tolerancia al estrés (Tollenaar *et al.*, 2002) para la selección de genotipos y ambientes entre otros.

Para obtener el mejor rendimiento y calidad de semilla al menor costo, a través del uso eficiente de los insumos y recursos naturales, se han evaluado híbridos (Lozano-Ramírez *et al.*, 2015; Vázquez-Carrillo *et al.*, 2016), y sus progenitores (Espinosa *et al.*, 1995; Virgen-Vargas *et al.*, 2014 y 2016; Abuali *et al.*, 2014; Bertoia and Aulicino, 2014), e identificado sitios con alto potencial de producción (Arellano-Vázquez *et al.*, 2011), cuantificándose además, la interacción genotipo ambiente; sin embargo, existe poca información sobre la IGA en la calidad de semilla.

Por lo anterior, es necesario contribuir con información para el desarrollo de tecnología en la producción de semilla de maíz de los Valles Altos de México.

## **1. Objetivos**

### **General**

Contribuir al desarrollo de tecnología para la producción de semilla de maíz con calidad física y fisiológica, en localidades alternativas a los Valles Altos, que permita aumentar su rendimiento.

### **Específicos.**

1. Evaluar la estabilidad del rendimiento de semilla de líneas y cruzas simples progenitoras de híbridos trilineales de maíz adaptados a Valles Altos de México.
2. Identificar la interacción genotipo ambiente en las características de calidad física y fisiológica de líneas endogámicas y cruzas simples, progenitoras de híbridos trilineales de maíz adaptados a Valles Altos de México.
3. Determinar la correlación de los caracteres agronómicos y de calidad física y fisiológica, e identificar los que están más asociados al rendimiento.

## **2. Hipótesis.**

1. La estabilidad en rendimiento de semilla de líneas y cruzas simples progenitoras de híbridos trilineales de maíz es afectada por las condiciones agroclimáticas.
2. La interacción genotipo ambiente en las características de la calidad física y fisiológica de líneas endogámicas y cruzas simples progenitoras de híbridos trilineales de maíz es afectada por las condiciones agroclimáticas.

3. La asociación entre variables agronómicas, de calidad física y fisiológica, así como sus efectos directos e indirectos permiten identificar cuáles son los mejores caracteres para predecir el rendimiento.

### 3. Literatura citada

- Abakemal, D.; Shimelis, H. and Derera, J. 2016. Genotype-by-environment interaction and yield stability of quality protein maize hybrids developed from tropical-highland adapted inbred lines. *Euphytica* 209:757–769.
- Abdullah, Z.; Khan, M. A.; Flowers, T. J. 2001. Causes of sterility in seed set of rice under salinity stress. *Journal Agronomy & Crop Science* 187:25-32. DOI: 10.1046/j.1439-037X.2001.00500.x.
- Abuali, A.I.; Abdelmula, A.A.; Khalafalla, M.M.; Hamza, N.B.; Abdalla, A.H. and Idris, A.E. 2014. Assesment of yield stability and adaptability of parental inbred lines and F<sub>1</sub>-hybrids of grain maize (*Zea mays* L.) using AMMI analysis. *British Biotechnology Journal* 4:339-349.
- Ahmadi, J.; Mohammadi, A. and Najafi, M.T. 2012. Targeting promising bread wheat (*Triticum aestivum* L.) lines for cold climate growing environments using AMMI and SREG GGE biplot analyses. *Journal of Agricultural Science and Technology* 14: 645-657.
- Arellano-Vázquez, J.L.; Virgen-Vargas, J.; Ávila-Perches, M.A. 2010. H-66 híbrido de maíz para los Valles Altos de los estados de México y Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1:257-26.

- Arellano-Vázquez, J.L.; Virgen-Vargas, V.J.; Rojas-Martínez, I. y Ávila-Perches, M.A. 2011. H-70: Híbrido de maíz de alto rendimiento para temporal y riego del altiplano central de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:619-626.
- Becker, H.C. 1981. Correlations among some statistical measures of phenotype stability. *Euphytica* 30:835-840.
- Bertoia, L.M. and Aulicino, M.B. 2014. Maize forage aptitude: Combining ability of inbred lines and stability of hybrids. *The Crop Journal* 2:407-418.
- Crossa, J.; Gauch, H.G. and Zobel, R.W. 1990. Additive main effect and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop Science* 30:493-500.
- Da-Silva, P.R.; Bisognin, D.A.; Locatelli, A.B.; Storck, L. 2014. Adaptabilidade e estabilidade de híbridos de milho em condições de alto rendimento de grãos. *Acta Scientiarum Agronomy* 36:175-181.
- EnayatGholizadeh, M.R.; Bakhshandeh, A.M.; Dehgan, S.M; Ghainei, M.H.; Alami S.K.H.; Sharafizadeh M. 2012. Effect of source and seed size on yield component of corn S.C704 in Khuzestan. *African Journal of Biotechnology* 11:2938–2944. DOI: 10.5897/AJB11.2720.
- Espinosa, A.; Gómez, N.; Sierra, M.; Betanzos, E.; Caballero, F.; Coutiño, B.; Palafox, A.; Rodríguez, F.; García, A.; Cano, O. 2003. Tecnología y producción de semillas de híbridos y variedades sobresalientes de maíz de calidad proteínica (QPM) en México. *Agronomía Mesoamericana* 14:223-228.
- Espinosa, A.; Tadeo, M.; Piña del Valle, A. 1995. Estabilidad del rendimiento en híbridos de maíz por diferente orden de cruza en la producción de semilla. *Agronomía mesoamericana* 6:98-103.

- Espinosa-Calderón, A; Sierra-Macías, M. y Gómez-Montiel, N.O. 2002. Producción y tecnología de semillas mejoradas de maíz por el INIFAP en el escenario sin la PRONASE. *Agronomía Mesoamericana* 14:117-121.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Departamento de agricultura. El maíz en la nutrición humana. 1993 [http://www.fao.org/docrep/t0395s/T0395S03.htm#Capitulo 2](http://www.fao.org/docrep/t0395s/T0395S03.htm#Capitulo_2) Composición química y valor nutritivo del maíz. Acceso en: 19 de Noviembre, 2017.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2009. Global agriculture towards 2050. How to feed the world 2050. Rome. Italy. 4 pp. Acceso en: 19 de Noviembre, 2017.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2012. Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. <http://www.fao.org/docrep/004/Y3557S/y3557s08.htm>. Acceso en: 10 de Mayo, 2017.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2012a. La subnutrición en el mundo 2012. <http://www.fao.org/docrep/017/i3027s/i3027s02.pdf1>. Acceso en: 10 de Mayo, 2017.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2016. Food Outlook. Biannual report on global food markets. <http://www.fao.org/giews/reports/food-outlook/es/>. Acceso en: 19 de Noviembre, 2017.
- Filho, J.M. 2015. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. *Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.)* 72:363-374. DOI:10.1590/0103-9016-2015-0007.

- García, M.P.J.; Cabrera, P.S.R.; Pérez, C.A.A.; Silva, D.R.J.; Álvarez, P.R.M.; Marín, R.C.A; Monasterio, P.P.; Santella, Q.M.D. 2009. Estabilidad del rendimiento y potencial agronómico de cultivares de maíz de endospermo normal y QPM en zonas agroecológicas de Venezuela. *Agronomía Tropical* 59:433-443.
- García-Salazar, J.A. y Ramírez-Jaspeado, R. 2014. El mercado de la semilla mejorada de maíz (*Zea mays* L.) en México. Un análisis del saldo comercial por entidad federativa. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37:69-77.
- Gauch, H.G. 2006. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Science* 46:1488–1500.
- Goggi, A.S; Carage, P.; Pollak, L.; McAndrews, G.; DeVries, M. and Montgomery K. 2008. Seed quality assurance in maize breeding programs: tests to explain variations in maize inbreds and populations. *Agronomy Journal* 100:337-343.
- Gómez-Montiel, N.O.; Sierra-Macías, M.; González-Camarillo, M.; Cantú-Almaguer, M.A.; Ramírez-Fonseca, A.; Wong-Pérez, J.J.; Manjarrez-Salgado, M.; Ramírez-Díaz, J.L.; Espinosa-Calderón, A. 2008. H-562, Híbrido de maíz de alto rendimiento para el trópico húmedo y seco de México. *Agricultura Técnica México* 34:101-105.
- González-Merino y Ávila Castañeda. 2014. El maíz en Estados Unidos y en México. Hegemonía en la producción de un cultivo. *Revueltas Interconectadas. Redes, Comunicación y Movimientos Sociales* 75:217-237.
- Gordon-Mendoza, R.; Camargo-Buitrago, I.; Franco-Barrera, J. y González-Saavedra, A. 2006. Evaluación de la adaptabilidad y estabilidad de 14 híbridos de maíz, Azuero, Panamá. *Agronomía Mesoamericana* 17:189-199.
- Lozano-Ramírez, A.; Santacruz-Varela, A.; San-Vicente-García, F.; Crossa, J.; Burgueño, J.; Molina-Galán, J.D. 2015. Modelación de la interacción genotipo x ambiente en

- rendimiento de híbridos de maíz blanco en ambientes múltiples. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38:337-347.
- López-Morales, F.; Vázquez-Carrillo, Ma.G.; Molina-Galán, J.D.; García-Zavala, J.J.; Corona-Torres, T.; Cruz-Izquierdo, S.; López-Romero, G.; Reyes-López, D.; Esquivel-Esquivel, G. 2017. Interacción genotipo-ambiente, estabilidad del rendimiento y calidad de grano en maíz tuxpeño. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8:1035-1050.
- Luna-Mena, B.M.; Hinojosa Rodríguez, M.A.; Ayala-Garay, O.J.; Castillo-González, F. y Mejía-Contreras, J.A. 2012. Perspectivas de desarrollo de la industria semillera de maíz en México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:1-7.
- Mancera-Rico, A.; García de los Santos, G.; Carballo-Carballo, A.; Villaseñor-Perea, C.A.; Martínez-Garza, A.; Estrada-Trejo. 2007. Calidad fisiológica y daño físico e semilla de maíz sometida a impacto. *Agricultura Técnica en México* 33:125-133.
- Manuel-Rosas, I.; Gil-Muñoz, A.; Ramírez-Valverde, B.; Hernández-Salgado, J.H.; Bellon, M. 2007. Calidad física y fisiológica de semilla de maíz criollo almacenada en silo metálico y con métodos tradicionales en Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30:69-78.
- Milošević, M.; Vujaković, M.; Karagić, D. 2010. Vigour test as indicators of seed viability. *Genetika* 42:103-118.
- Molina, G.J.D. 1992. Introducción a la genética de poblaciones y cuantitativas. Algunas implicaciones en genotecnia. A.G.T Editor, México, DF.
- Moterle, L.M.; Braccin, A.L.; Scapim, C.A.; Pinto, R.J.B.; Gonçalves, L.S.; Amaral Junior, A.T.; Silva, T.R.C. 2011. Combining ability of tropical maize lines for seed quality and agronomic traits. *Genetics and Molecular Research* 10:2268-2278. DOI: 10.4238/vol10-3gmr1129.

- ONU, United Nations. 2015. Department of economic and social affairs. Population division. World population prospects, the 2015 revision. <https://esa.un.org/unpd/wpp/Graphs/Probabilistic/POP/TOT/>. Acceso May. 10, 2017.
- Pecina-Martínez, J.A.; Mendoza-Castillo, M.C.; López-Santillán, J.A.; Castillo-González, F.; Mendoza-Rodríguez, M. 2009. Respuesta morfológica y fenológica de maíces nativos de Tamaulipas a ambientes contrastantes de México. *Agrociencia* 43: 681-694.
- Pérez-Mendoza, C.; Hernández-Livera, A.; González-Cossio, F.V.; García de los Santos, G.; Carballo-Carballo, A.; Vásquez-Rojas, T.R. y Tovar-Gómez, MA. 2006. Tamaño de semilla y relación con su calidad fisiológica en variedades de maíz para forraje. *Agricultura técnica de México* 32:341-352.
- Raya-Pérez, C.; Aguirre-Mancilla, C.L.; Medina-Ortiz, J.G., Ramírez-Pimentel, J.G.; Andrio-Enriquez, E.; Castellanos-Sánchez, C. y Covarrubias-Prieto, J. 2012. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3:633-641.
- Rodríguez-Pérez, J.E.; Sahagún-Castellanos, J.; Villaseñor-Mir, H.E.; Molina-Galán, J.D. y Martínez-Garza, A. 2002. Estabilidad de siete variedades comerciales de trigo (*Triticum aestivum* L.) de temporal. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:43-151.
- Ruiz-Corral, J.A.; Medina-García, G.; Ramírez-Díaz, J.L.; Flores-López, H.E.; Ramírez-Ojeda, G.; Manríquez-Olmos, J.D.; Zarazúa-Villaseñor, P.; González-Eguiarte, D.R.; Díaz-Padilla, G.; De la Mora-Orozco, C. 2011. Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:309-323.



- Sánchez-Pérez, B.E.; Ruiz-Torres, N.A.; Rincón-Sánchez, F. Burciaga-Dávila, H.C. 2011. Caracterización física y fisiológica de poblaciones criollas de maíz bajo dos sistemas de producción. *Revista Agraria –Nueva Época* 8:6-11.
- Setimela, P.S.; Crossa, J.; 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* 27:207-214.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2014. Estadística de la producción 2014. <http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/siap/Paginas/estadistica.aspx>. Acceso en: 19 de Noviembre, 2017.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2016. Estadística de la producción 2016. <http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/siap/Paginas/estadistica.aspx>. Acceso Noviembre 19, 2017.
- SNICS, 2014. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. Estadísticas de producción de semillas. Disponible en: <<http://snics.sagarpa.gob.mx/certificacion/Paginas/PreciosyExistencias.aspx>>. Acceso en: 1 de Diciembre, 2016.
- SNICS, 2016. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. Estadísticas de producción de semillas. Disponible en: <<http://snics.sagarpa.gob.mx/certificacion/Paginas/PreciosyExistencias.aspx>>. Acceso en: 1 de Diciembre, 2016.
- Tollenaar, M.; Ahmadzadeh A.; Lee, E. A. 2004. Physiological basis of heterosis for grain yield in maize. *Crop Science* 44:2086-2094.

- Torre Flores, J.L.; Mendoza-García, B.; Prasanna, B.M.; Alvarado, G.; San Vicente, F.M. and Crossa, J. 2017. Grain yield and stability of white early maize hybrids in the Highland Valleys of Mexico. *Crop Science* 57:3002-3015.
- Turrent-Fernández, A. 2009. El potencial productivo del maíz. *Ciencias* 92-93:126-129.
- Vázquez-Carrillo, M.G.; Mejía-Andrade, H.; Tut-Couoch, C.; Gómez-Montiel, N. 2012. Características de granos y tortillas de maíces de alta calidad proteínica desarrollados para los Valles Altos Centrales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:23-31.
- Vázquez-Carrillo, M.G.; Rojas-Martínez, I.; Santiago Ramos, D.; Arellano-Vázquez, J.L.; Espinosa-Calderón, A.; García-Pérez, M.; 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.
- Virgen Vargas, J.; Zepeda Bautista, R.; Arellano Vázquez, J.L.; Ávila Perches, M.A. y Rojas Martínez, I. 2013. Producción de semilla de progenitores e híbridos de maíz de Valles Altos en dos fechas de siembra. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria de México* 1:26-32.
- Virgen-Vargas, J.; Zepeda-Bautista, R.; Ávila-Perches M.A.; Espinosa-Calderón, A.; Arellano-Vázquez, J.L.; Gámez-Vázquez, A.J. 2014. Producción de semillas de líneas progenitoras de maíz: densidad de población e interacción. *Agronomía Mesoamericana* 25:323-335.
- Virgen-Vargas, J.; Zepeda-Bautista, R.; Ávila-Perches, M.A.; Espinosa-Calderón, A.; Arellano-Vázquez, J.L.; Gámez-Vázquez, A.J. 2016. Producción y calidad de semilla de maíz en Valles Altos de México. *Agronomía Mesoamericana* 27:191-206.

- Wang, B.; Zhang, Z.; Fu, Z.; Liu, Z.; Hu, Y.; Tang, J. 2016. Comparative QTL analysis of maize seed artificial aging between an immortalized F2 population and its corresponding RILs. *Crop Journal* 4:30–39.
- Yan, W. 2001. GGEbiplot—A Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. *Agronomy Journal* 93:1111–1118.
- Yan, W.; Hunt, L.A.; Sheng Q. and Szlavics, Z. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on GGE biplot. *Crop Science* 40:596–605.

## CAPÍTULO I

### ESTABILIDAD DEL REDIMIENTO DE SEMILLA DE LÍNEAS Y CRUZAS SIMPLES PROGENITORAS DE HÍBRIDOS TRILINEALES DE MAÍZ

#### 1.1 RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más importantes en el mundo. La producción de semilla de maíz de híbridos trilineales requiere de progenitores estables con rendimiento mayor a 1.0 y 3.5 t ha<sup>-1</sup> en líneas y cruzas simples; así como de híbridos con 4.5 t ha<sup>-1</sup> para garantizar la rentabilidad del cultivo, por lo que se requiere de genotipos que mitiguen los cambios climáticos en ambientes de producción. El objetivo de la investigación fue conocer la estabilidad del rendimiento de semilla de líneas endogámicas y cruzas simples, progenitoras de híbridos trilineales adaptados a Valles Altos de México. Durante 2014 y 2015, se evaluaron 15 genotipos: nueve líneas (M-55, M-54, CML-242, M-43, M-44, M-52, M-46, M-47 y M-48), tres cruzas simples (M-55xM-54, M-43xM-44 y M-47xM-46) y tres híbridos (H-70, H-66 y H-44), en tres localidades: Coatlínchán (COA), Celaya (CEL) y San Luis de la Paz (SLP), México, en un diseño de bloques al azar con tres repeticiones. Se midió el rendimiento de semilla, días a floración masculina y altura de planta. Se hizo el análisis de varianza combinado, la comparación múltiple de medias con Tukey ( $p \leq 0.05$ ) y para la interacción genotipo-ambiente se utilizó el modelo SREG. Los progenitores M-43xM-44 (5.2 t ha<sup>-1</sup>), M-55 (2.7 t ha<sup>-1</sup>), M-52 (2.2 t ha<sup>-1</sup>), M-54 (0.9 t ha<sup>-1</sup>) y el híbrido H-66 (6.6 t ha<sup>-1</sup>) fueron estables en rendimiento. La línea M-48 mostró adaptación específica en el ambiente CEL y la M-47xM-46 en SLP. En H-66, la sincronía de la floración tuvo un día de diferencia; la craza M-43xM-44 (2.4 m) y la línea M-43 (2.1 m) presentaron la mayor altura de planta. Los resultados sugieren a San Luis de la Paz y

Celaya como localidades alternativas a Valles Altos, con características aptas para la producción de semilla de progenitores de híbridos trilineales de maíz de Valles Altos de México.

**Palabras clave:** genotipos, ambientes, IGA, rendimiento, floración masculina, altura de planta

# STABILITY OF SEED YIELD OF PARENT LINES AND SIMPLE CROSSES OF MAIZE HYBRIDS

## 1.2 ABSTRACT

Maize (*Zea mays* L.) is one of the most important crops in the world. Maize seed production requires stable parents whose yield is higher than 3 t ha<sup>-1</sup>, and can alleviate climate changes in production environments. The objective of this study was to know the yield stability of endogamic line seeds, and simple crosses, parents of trilinear hybrids, which have been adapted to High Valleys in Mexico. From 2014 to 2015, 15 genotypes were assessed: nine lines (M-55, M-54, CML-242, M-43, M-44, M-52, M-46, M-47, and M-48), three simple crosses (M-55xM-54, M-43xM-44, and M-47xM-46), and three hybrids (H-70, H-66, and H-44), in three locations: Coatlinchán (COA), Celaya (CEL), and San Luis de la Paz (SLP), Mexico. They were carried out under a randomized block design with three replications. The traits assessed were seed yield, days to male flowering, and plant height. The combined variance analysis, and multiple comparison of means using Tukey ( $p \leq 0.05$ ) were carried out, the SREG model was used for genotype-environment interaction. The parents M-43xM-44, M-55, M-52, M-54, and the hybrid H-66 were stable regarding yield. Line M-48 showed specific adaptation in the CEL environment, and M-47xM-46 did in SLP. Regarding H-66, the synchrony in flowering showed a one-day difference; M-43xM-44 and line M-43 showed a taller plant height. These results suggest to San Luis de la Paz and Celaya as alternative localities with characteristics suitable for the production of seed of progenitors of trilinear maize hybrids of High Valleys of Mexico.

**Key words:** genotypes, environments, IGA, yield, male flowering, plant height

### 1.3 INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cereales más importantes en el mundo, se producen 1,039 millones de toneladas (FAO, 2016), proporciona más del 70 % de la ingesta calórica para humanos y animales (Setimela *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2016). En la actualidad, la producción de semilla a nivel mundial es un factor importante para satisfacer la demanda anual, convirtiéndose en una de las actividades más rentables en el campo de la agricultura (Milošević *et al.*, 2010), se producen 6.8 millones de toneladas de semilla híbrida para cubrir la producción mundial de maíz (FAO, 2013).

En México, el maíz, es la base de la alimentación de la población y se cultiva de 0 hasta 2,700 msnm. Las zonas agroecológicas para la producción son los Valles Altos (2,200-2,700 msnm), Zonas de Transición (1,800-2,200 msnm), Bajío (1,200-1,800 msnm), Trópico húmedo y Cálido seco (0-1,200 msnm) (Gómez-Montiel *et al.*, 2008; Pecina-Martínez *et al.*, 2009; Arellano-Vázquez *et al.*, 2010; Ruiz-Corral *et al.*, 2011). En 2016 se importaron 14.3 millones de t de maíz, que representan el 62 % de la producción (FAO, 2016). Una alternativa para reducir las importaciones es incrementar la producción de grano con el uso de semilla certificada con características agronómicas y productividad sobresaliente a cada región (Virgen-Vargas *et al.*, 2016). Durante 2014, se produjeron 51 mil 908 t de semilla, cantidad necesaria para sembrar 2 millones 595 mil 400 ha, que constituyen el 33 % de la superficie sembrada de maíz (SIAP, 2014).

El éxito de un genotipo, depende no sólo de su buen comportamiento en rendimiento y tolerancia a las principales plagas, sino, del desempeño que manifieste la interacción en los diferentes ambientes donde se prueba (García *et al.*, 2009; Ambika *et al.*, 2014). Se han realizado investigaciones para evaluar el rendimiento de progenitores de híbridos; así como,

la calidad genética, física y fisiológica de semilla y se han identificado sitios de producción (Virgen-Vargas *et al.*, 2016). Así como, se ha evaluado la estabilidad e interacción genotipo ambiente en híbridos (Lozano-Ramírez *et al.*, 2015; Vázquez-Carrillo *et al.*, 2016), variedades (Setimela *et al.*, 2007) y poblaciones (Malvar *et al.*, 2005; Martínez-Sánchez *et al.*, 2016) de maíz para la selección de genotipos con rendimiento estable. La interacción genotipo ambiente (IGA) es uno de los aspectos importantes para la generación de tecnología para la producción de semilla de maíz en nuevas áreas, que permitan el incremento en el uso de semilla certificada y del rendimiento del cultivo. Sin embargo, la información sobre la adaptación de líneas y cruzas simples progenitoras de híbridos de maíz en regiones de Transición y Bajío alternativas para la producción e incremento de semilla, es limitada y específica; por ello, el objetivo de la investigación fue conocer la estabilidad del rendimiento de semilla de líneas y cruzas simples progenitoras de híbridos trilineales de maíz para Valles Altos e identificar localidades de producción para el incremento de genotipos.

## **1.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Germoplasma, localidades de evaluación y manejo agronómico**

En 2014 y 2015, se evaluaron tres híbridos trilineales, sus líneas endogámicas y sus cruzas simples progenitoras (Cuadro 1.1); en las localidades de Coatlinchán (COA), Estado de México, San Luis de la Paz (SLP) y Celaya (CEL), en Guanajuato, diferentes en altura sobre el nivel del mar, temperatura y precipitación. En la localidad de CEL sólo se estableció un ensayo en el primer año de estudio, por lo que se consideraron cinco ambientes (Cuadro 1.2). El suelo de la localidad de COA presenta un contenido de N y P



moderadamente alto y alto a diferencia de San Luis de la Paz y Celaya que presentan un contenido mediano, suficiente P para obtener rendimientos mayores a  $12 \text{ t ha}^{-1}$  en maíz (Castellanos *et al.*, 2005); en materia orgánica las tres localidades son moderadamente altas, en contenido de micronutrientes sobresale la localidad de CEL y COA (Cuadro 1.3). La densidad de población fue de 65,000 plantas por ha, se fertilizó con la fórmula 150-70-00 (NPK), como fuente de nitrógeno (N) se aplicó sulfato de amonio y como fósforo (P) superfosfato de calcio triple, todo el P y la mitad del N se incorporó en la siembra y la mitad restante en la segunda escarda (35 a 40 días después de la siembra). Los ensayos se condujeron bajo condiciones de riego en Celaya (2014) y San Luis de la Paz (2014 y 2015) se aplicaron un riego de germinación y dos de auxilio, el primero a los 55-60 días después de la siembra y el segundo a los 90 a 95 días. El control de malezas se realizó con escarda mecánica y la aplicación de una mezcla de herbicida preemergente de Atrazina + S-metolaclor ( $2 \text{ L ha}^{-1}$ ) y una aplicación de herbicida postemergente de Foramsulfuron + Iodosulfuron metil sodio ( $150 \text{ g ha}^{-1}$ ), treinta días después de la emergencia del cultivo. Para el control del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) se realizó una aplicación de Spinetoram ( $100 \text{ mL ha}^{-1}$ ) y una de Clorpirifos etil ( $1 \text{ L ha}^{-1}$ ).

**Cuadro 1.1 Genealogía de genotipos de maíz evaluados en cinco ambientes en el Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**

Genotipos	Genealogía	Tipo
M-55 <sup>a</sup>	Tlax 151 SFC1-11-2-2-2	Línea ♀ ♀ H-70
M-54 <sup>a</sup>	Mich. 21 Comp.I-7-2-14-1-3	Línea ♂ ♀ H-70
M-55xM-54 <sup>a</sup>	(Tlax 151 SFC1-11-2-2-2) (Mich. 21 Comp.I-7-2-14-1-3)	CS♀ H-70
CML-242 <sup>b</sup>	Bat 8785 MH 10-1-1-2TL-1-3TL-3-1TL-b	Línea ♂ H-70
H-70 <sup>a</sup>	(M-54xM-55) x CML-242 (Testigo)	Híbrido trilineal
M-43 <sup>a</sup>	Mich 21-181-14-1-16-5	Línea ♀ ♀ H-66
M-44 <sup>a</sup>	Mich21 Comp I-7-2-11-9	Línea ♂ ♀ H-66
M-43xM-44 <sup>a</sup>	(Mich 21-181-14-1-16-5) (Mich21 Comp I-7-2-11-9)	CS♀ H-66
M-52 <sup>b</sup>	CML 169 BPVC-159-B-1-1-1-2-BTL	Línea ♂ H-66
H-66 <sup>a</sup>	(M-43xM-44) x M-52 (Testigo)	Híbrido trilineal
M-47 <sup>a</sup>	Tlax.77-2-1-2	Línea ♀ ♀ H-44
M-46 <sup>a</sup>	Mich 21-Comp I-7-2-14-5	Línea ♂ ♀ H-44
M-47xM-46 <sup>a</sup>	(Tlax.77-2-1-2) (Mich 21-Comp I-7-2-14-5)	CS♀ H-44
M-48 <sup>a</sup>	Pob87xSIB/-1-4-3	Línea ♂ H-44
H-44 <sup>a</sup>	(M-46xM-47) x M-48 (Testigo)	Híbrido trilineal

<sup>a</sup>Líneas obtenidas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); <sup>b</sup>líneas obtenidas por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

**Cuadro 1.2 Localidades de evaluación, localización geográfica y fechas de siembra de progenitores e híbridos trilineales de maíz. Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**

Localidad	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (msnm <sup>1</sup> )	Fecha de siembra		Tipo de suelo <sup>6</sup>
				2014	2015	
COA <sup>2</sup>	19°29'05"	98°53'11"	2,250	08-mayo	07-mayo	F <sup>5</sup> . Arenoso
SLP <sup>3</sup>	21°13'11"	100°29'41"	2,004	21-mayo	22-junio	F. arenoso
CEL <sup>4</sup>	20°34'40"	100°49'37"	1,765	15-mayo	---	F. arcilloso

<sup>1</sup>msnm: metros sobre el nivel del mar, <sup>2</sup>COA: Coatlinchán, <sup>3</sup>SLP: San Luis de la Paz, <sup>4</sup>CEL: Celaya, <sup>5</sup>F: franco, <sup>6</sup>procedimiento Bouyoucos método AS-09.

**Cuadro 1.3 Análisis químico de suelo de las localidades de evaluación de progenitores e híbridos trilineales de maíz. Estado de México y Guanajuato, México. 2014.**

Localidad	pH <sup>1</sup>	N <sup>2</sup>	P <sup>3</sup>	K <sup>4</sup>	M.O. <sup>5</sup>	Ca <sup>4</sup>	Mg <sup>4</sup>	Na <sup>4</sup>	Fe <sup>6</sup>	Zn <sup>6</sup>	Mn <sup>6</sup>	Cu <sup>6</sup>
		ppm			%	ppm						
COA	6.28	31.1	47.5	222	2.1	2116	615	108	15.5	1.3	11.9	0.7
SLP	7.16	13.0	15.3	844	2.3	2818	168	129	4.0	1.1	7.4	0.6
CEL	7.65	14.4	18.4	1110	2.6	5276	679	392	7.4	1.4	11.7	1.0

COA: Coatlínchán, SLP: San Luis de la Paz, CEL: Celaya. pH: potencial hidrógeno, N: nitrógeno, P: fósforo, K: potasio, M.O.: materia orgánica, Ca: Calcio, Mg: magnesio y Na: sodio; Fe: fierro, Zn: zinc, Mn: manganeso y Cu: cobre. <sup>1</sup>Método relación 1:2, <sup>2</sup> micro-Kjeldahl, <sup>3</sup>Bray y Olsen, <sup>4</sup>extracción en NH<sub>4</sub>O Ac 1M pH 7, <sup>5</sup>Walkley-Black y <sup>6</sup>extracción con DTPA.

### Diseño y unidad experimental

En cada ambiente se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, de acuerdo al siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + e_j + (ge)_{ij} + b_k(j) + E_{ijk}$$

en donde:

$Y_{ijk}$  = Valor del carácter promedio del i-ésimo genotipo obtenido en el j-ésimo ambiente y k-ésima repetición;  $\mu$  = efecto de la media general;  $g_i$  = efecto del i-ésimo genotipo;  $e_j$  = efecto del j-ésimo ambiente;  $(ge)_{ij}$  = efecto de la interacción entre el i-ésimo genotipo y el j-ésimo ambiente;  $b_k(j)$  = efecto de la k-ésima repetición en el j-ésimo ambiente;  $E_{ijk}$  = efecto aleatorio del error experimental asociado al i-ésimo genotipo en el j-ésimo ambiente y k-ésima repetición.

La unidad experimental fue de cuatro surcos de 5 m de largo, y 0.86 m de distancia entre surcos, la parcela útil fueron los dos surcos centrales.

### **VARIABLES EVALUADAS**

Los caracteres evaluados fueron: 1) rendimiento (REN), en  $t\ ha^{-1}$  al 14 % de humedad, se calculó con la fórmula:  $REN = [PC \times \% MS \times \% G \times FC] / 8600$ ; donde PC = peso de campo de mazorca en  $t\ ha^{-1}$ , % MS = porcentaje de materia seca (100 - % humedad de semilla); % G = porcentaje de semilla, como promedio de la relación entre el peso de semilla y el peso de mazorca sin brácteas, de cinco mazorcas, multiplicado por 100; FC = factor de corrección ( $10\ 000\ m^2$  / la superficie útil de la parcela); 8600 = valor constante, que permite estimar el rendimiento con una humedad del 14 %. 2) Días a floración masculina (FM), se cuantificaron los días a partir de la fecha de siembra hasta que el 50 % de las plantas de la parcela experimental estuvieron derramando polen. 3) Altura de planta (AP), se midió de la base del tallo hasta la base de la espiga en cm.

### **ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Se hizo un análisis de varianza combinado con un modelo mixto (SAS, 2000), donde los ambientes (A) se consideraron como efectos aleatorios y los genotipos (G) como efectos fijos. Se empleó la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para la comparación de medias.

Para el análisis de interacción genotipo-ambiente (IGA) se utilizó el modelo SREG que integra el análisis de varianza y el de componentes principales, con el programa GEAR (Pacheco *et al.*, 2015), cuyo modelo estadístico es:

$$\bar{Y}_{ga.} = \mu + \delta_a + \sum_{k=1}^t \lambda_k \alpha_{gk} \gamma_{ak} + \bar{\varepsilon}_{ga.},$$

en donde:

$\bar{Y}_{ga.}$  es la media del genotipo  $g$  ( $g = 1, 2, \dots, g$ ) en el ambiente  $a$  ( $a = 1, 2, \dots, a$ ) para los genotipos  $g$  y ambientes  $a$ ;  $\mu$  es la media general;  $\delta_a$  es el efecto del ambiente;  $\lambda_k$  son las constantes escalares (valores singulares) que permiten la comparación ortogonal con el valor del vector singular de los genotipos, sitios  $\alpha_g$  y localidades  $\gamma_k$ ;  $\alpha_{gk}$  y  $\gamma_{ak}$  son los denominados efectos primarios, secundarios y terciarios del cultivar  $g$  en el ambiente  $a$ , respectivamente;  $\bar{\varepsilon}_{ga.}$  es el error del modelo con distribución normal  $(0, \sigma^2/r)$ , e independiente, donde  $\sigma^2$  es la varianza del error y  $r$  es el número de repeticiones.

En el modelo SREG, el efecto principal de G más la IGA se asumen como términos lineales-bilineales (Burgueño *et al.*, 2001; Crossa y Cornelius, 2002).

## 1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1.5.1 Condiciones climáticas de los ambientes de prueba

Las principales diferencias entre los ambientes de evaluación (Cuadro 1.2 y 1.3) fueron: a) la altitud, en la localidad de Celaya, Guanajuato es de 1,765 metros sobre el nivel del mar (msnm), considerada como parte del mega ambiente de El Bajío, hasta Coatlinchán, Estado de México (2,250 msnm), que se ubica en el mega ambiente de Valles Altos, por lo que en altitud se cubrió un rango de 485 m; y San Luis de la Paz, que se encuentra a (2,004 msnm), y se sitúa en el mega ambiente de Zona de Transición; b) el tipo de suelo, que en todos los casos fue del tipo franco, con variaciones de arenoso y arcilloso, c) la precipitación que varió de 461 a 834 mm durante el período de crecimiento del cultivo

(CNA, 2016), d) pH del suelo desde ligeramente ácido a neutro y e) contenido de elementos mayores y micronutrientes con valores bajos hasta ligeramente altos. La localidad de COA y SLP tienen similar altitud; sin embargo, la precipitación fue diferente ya que, en COA, en promedio, fue 70 % superior que en SLP. En CEL existen condiciones contrastantes de altitud en comparación a COA y SLP, pero en precipitación, CEL presentó diferencias con COA al registrar solo el 58 % de la precipitación (Cuadro 1.4).

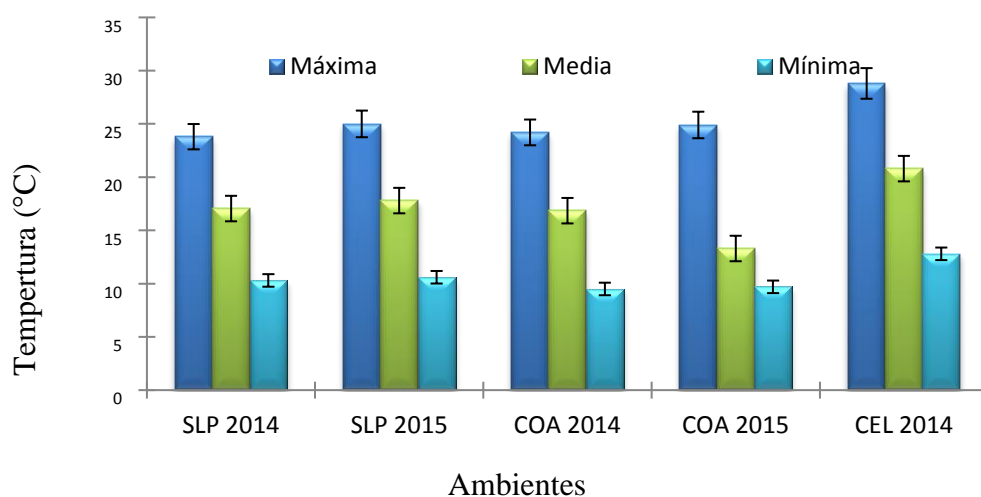
**Cuadro 1.4 Precipitación pluvial de los cinco ambientes de evaluación de progenitores e híbridos trilineales de maíz. Estado de México y Guanajuato 2014-2015.**

Ambientes	Precipitación (mm*) mensual durante el ciclo fenológico del cultivo							
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Acumulada
COA 2014	110	195	202	90	124	99	15	834
COA 2015	153	251	106	100	114	10	18	752
SLP 2014	64	104	71	70	125	30	13	476
SLP 2015	16	59	76	71	147	28	20	417
CEL 2014	49	129	44	105	32	82	21	461

\*milímetros de precipitación, May: mayo, Jun: junio, Jul: julio, Ago: agosto, Sep: septiembre, Oct: octubre y Nov: noviembre. COA: Coatlinchán, CEL: Celaya y SLP: San Luis de la Paz.

Durante el desarrollo del cultivo, el rango de variación de la temperatura máxima, media y mínima entre ambientes fue de 5, 8 y 3 °C, respectivamente (Figura 1.1). Así mismo, la temperatura máxima y mínima durante el ciclo de desarrollo del cultivo fueron similares entre todos los ambientes, excepto en CEL 2014 en donde se registró la mayor temperatura máxima, media y mínima (29, 21 y 13 °C, respectivamente). En COA 2015 se

presentó una temperatura media (13 °C) menor que en SLP 2014, SLP 2015 y COA 2014. El ambiente de CEL 2014 fue el más contrastante, con mayor temperatura, menor altitud y precipitación, a diferencia de los ambientes de Valles Altos y Zona de Transición. Las altas temperaturas en CEL 2014 influyeron en la producción de las plantas por su influencia en los procesos de crecimiento como la fotosíntesis, ocasionando que los estomas de las hojas se cierran para evitar la deshidratación (Lira-Saldivar, 2007); también las altas temperaturas reducen la duración de la etapa de madurez disminuyendo la calidad, que acompañada con poca humedad reducen el crecimiento y la receptibilidad de los estigmas afectando la polinización y reduciendo el rendimiento de semilla. La falta de humedad en las etapas críticas del cultivo de maíz amplía el periodo de floración de progenitores de híbridos dificultado la producción de semilla por asincronía.



**Figura 1.1** Temperaturas máximas, medias y mínimas registradas durante el ciclo del crecimiento del cultivo en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015 (Comisión Nacional del Agua, 2015).

### 1.5.2 Análisis de varianza combinado y comparación de medias

El análisis de varianza combinado para rendimiento (REN), días a floración masculina (FM) y altura de planta (AP) (Cuadro 1.5) mostró, diferencias estadísticas ( $p \leq 0.01$ ), entre ambientes (A), genotipos (G) (progenitores e híbridos) y para la interacción genotipo ambiente (IGA). La fuente de variación de mayor importancia con base en la magnitud de sus cuadrados medios, fue A, seguida de G y de la IGA. De la varianza total para la expresión del REN, el A tuvo una mayor importancia, al aportar el 59 %, seguido por el efecto del G con 39 % y la IGA que aportó el 2 %. En la expresión del número de días a FM, el A determinó el 78 % de la varianza, seguido con 21 % del G y la IGA influyó con 1 % en dicho carácter. Para la expresión de la AP el A influyó 80 %, el G 19 % y la IGA 1 %. Los ambientes fueron la principal causa de variación para las variables en el modelo A+G+IGA. Gauch y Zobel (1997) mencionan que el A representa aproximadamente el 80 % del total de la variación en los ensayos multiambientes. La diferencia significativa, en la IGA justifica el análisis de dicha interacción, así como el de estabilidad de los genotipos en la expresión del REN.



**Cuadro 1.5 Cuadrados medios del análisis de varianza combinado para variables agronómicas de progenitores e híbridos de maíz evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**

Fuentes de variación	Grados de libertad	Rendimiento	Floración masculina	Altura de planta
Ambiente (A)	4	113.09 **	878.01 **	9.2 **
Genotipo (G)	14	73.36 **	237.94 **	2.2 **
G*A	56	4.25 **	3.78 **	0.07 **
Error	140	0.43	0.77	0.01
R <sup>2</sup>		0.97	0.99	0.98
C.V. (%)		16.14	1.12	5.12
$\bar{x}$		3.87	76.88	1.86

\*\*Significativo ( $p \leq 0.01$ ), R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación, C.V.: coeficiente de variación,  $\bar{x}$ : media aritmética.

### Ambientes

En cuanto al efecto de ambientes se observaron diferencias estadísticas (Cuadro 1.6), para rendimiento, el mejor comportamiento lo tuvo el ambiente, COA 2014 en donde se presentó un rango de temperaturas de 9.5 - 24.2 °C y una precipitación de 833.9 mm durante el ciclo del cultivo, a diferencia de CEL 2014 que fue el de menor REN con temperaturas de 12.8 – 28.8 °C y una precipitación de 461 mm. En general, se observa que los ambientes de Valles Altos, presentaron las mejores condiciones para la expresión del rendimiento, ya que en 2014 fue mayor en comparación con 2015; lo cual se explica porque los progenitores fueron seleccionados y evaluados para generar híbridos trilineales adaptados para la producción en esta mega región (Setimela *et al.*, 2007). No obstante que, los experimentos se condujeron bajo condiciones de riego, la correlación entre rendimiento

y precipitación entre los ambientes, fue de  $r=0.88$ , debido a que se modificaron favorablemente la humedad relativa y temperatura, factores que influyen en la fisiología de la planta (Lira-Saldívar, 2007).

**Cuadro 1.6 Prueba de medias entre los ambientes de evaluación para variables agronómicas de progenitores e híbridos de maíz en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**

Ambiente	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	Floración masculina (días)	Altura de Planta (m)
COA 2014	5.7 a	79.0 b	2.5 a
COA 2015	4.9 b	80.9 a	1.9 c
SLP 2014	3.9 c	77.7 c	1.4 d
SLP 2015	2.8 d	77.3 c	1.4 d
CEL 2014	1.8 e	69.4 d	2.0 b
DSH	0.37	0.50	0.06

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). DSH: diferencia significativa honesta.

Se encontraron diferencias estadísticas ( $p \leq 0.05$ ), para floración entre ambientes; en la localidad de Coatlinchán se registró el mayor número de días a FM, seguido por San Luis de la Paz, y finalmente en Celaya se registrarse los valores menores (Cuadro 1.5) debido a las temperaturas mínimas mensuales en Valles Altos (6 °C) (Coatlinchán) y ( 7 °C) Zonas de Transición (San Luis de la Paz) y a las máximas mensuales en Celaya (14 °C) (Figura 1.1), así como, a la diferencia en altitud (485 m). Los días a floración son influenciados por el ambiente en función de la altitud y la temperatura, en lugares cálidos y con bajas

altitudes se reducen los días a floración; acelerando las fases fenológicas del cultivo y reduciendo los rendimientos y a mayor altitud el desarrollo de la espiga y dispersión del polen es más lento debido a las temperaturas más bajas (Arellano-Vázquez *et al.*, 2011; Virgen-Vargas *et al.*, 2014). Entre localidades, la AP fue mayor en COA 2014 (2.5 m) a diferencia de SLP (1.4 m) que presentó los valores inferiores; la AP se asoció con la precipitación ( $r= 0.81$ ).

La variación de REN (1.8-5.7 t ha<sup>-1</sup>), FM (69.4-80.9 días) y AP (1.4-2.5 m) explicada por los ambientes indica que los entornos ecológicos fueron diversos.

## **Genotipos**

En las líneas endogámicas hembra (Cuadro 1.7), las de mayor REN fueron M-47 y M-55 ( $p \leq 0.05$ ), progenitores femeninos de la cruce simple (CS) de H-44 y H-70 respectivamente; en comparación con M-43, progenitor hembra de la CS del H-66. De las seis líneas macho, la de mayor REN fue M-48, progenitor de H-44, seguida de M-52 y M-46; mientras que las líneas M-54, CML-242 y M-44 tuvieron el rendimiento menor. La cruce simple hembra (M-46xM-47) del H-44 superó en REN, a sus similares del H-66 y H-70, esta misma cruce al igual que su similar de H-70, fueron más precoces que la cruce simple hembra del H-66. Entre híbridos, el H-70 rindió en promedio 1,000 y 900 kg ha<sup>-1</sup> más que H-66 y H-44, respectivamente (Cuadro 1.7); y se ubicó en el segundo grupo estadístico por su número de días a FM ( $p \leq 0.05$ ), su AP fue similar al H-44, superando por 10 cm al H-66. La línea M-43 y CS M-43xM-44, progenitores del H-66, fueron las de mayor altura de planta. Los rendimientos del H-70 fueron similares a los reportados por Arellano-Vázquez *et al.* (2011); el mayor REN de los híbridos se asocia con la combinación de progenitores derivados de diferente origen geográfico, el H-70 y H-44

tienen progenitores de tres orígenes diferentes, mientras que el H-66 solamente tiene de dos (Arellano-Vázquez *et al.*, 2010), por lo que probablemente la heterosis sea definitiva en la expresión del rendimiento (Tollenaar *et al.*, 2004) o la expresión de genes aditivos (Mendes *et al.*, 2003). Al evaluar líneas progenitoras de híbridos en tres ciclos agrícolas con dos densidades de población, se reportan REN de 7.7 t ha<sup>-1</sup> en M-48 (Virgen-Vargas *et al.*, 2014); REN asociado a su origen, ya que se formó con germoplasma de clima templado, subtropical y de Valles Altos; así como a su nivel de endogamia (S<sub>3</sub>), que permitió amortiguar los diferentes cambios de temperatura y humedad. Márquez (1992) menciona que la respuesta de los cultivares, al evaluarlos en diferentes ambientes es muy variable, lo cual depende de la diversidad genética de cada cultivar; un cultivar heterogéneo genéticamente (heterocigótico) puede tener una mayor adaptabilidad que uno homogéneo (homocigótico).

Los rendimientos medios obtenidos por líneas hembras y macho (2.6 y 2.1 t ha<sup>-1</sup>), cruza simples (5.1 t ha<sup>-1</sup>) y los híbridos (6.9 t ha<sup>-1</sup>) coinciden con los reportados para la producción de semilla por Virgen-Vargas *et al.* (2016), y son mayores a 1.0, 3.5 y 4.5 t ha<sup>-1</sup> para líneas, cruza simples e híbridos; a excepción de la línea M-54 que presento un rendimientos menor (0.9 t ha<sup>-1</sup>), lo que implica la baja rentabilidad de la producción de la línea (Virgen *et al.*, 2013).

**Cuadro 1.7 Comparación de variables agronómicas de progenitores e híbridos de maíz evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**

Genotipo	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	Floración masculina (días)	Altura de planta (m)
M-43	2.4 h	80.9 b	2.1 d
M-47	2.8 g	75.3 e	1.9 e
M-55	2.7 g	74.6 f	1.7 g
$\bar{x}$	<u>2.6</u>	<u>76.9</u>	<u>1.9</u>
M-48	5 f	74.4 g	2 e
M-46	1.7 j	83.2 a	1.5 h
M-54	0.9 l	83.6 a	1.3 i
M-52	2.2 i	77 c	1.3 i
M-44	1.6 k	83.5 a	1.5 h
CML-242	1.5 k	77.4 c	1.2 j
$\bar{x}$	<u>2.1</u>	<u>79.8</u>	<u>1.4</u>
M-47xM-46	5.8 d	73.8 h	2.3 b
M-43xM-44	5.2 e	75.7 d	2.4 a
M-55xM-54	4.4 f	73.7 h	1.8 f
$\bar{x}$	<u>5.1</u>	<u>74.4</u>	<u>2.1</u>
H-70	7.6 a	73.5 i	2.2 c
H-66	6.6 c	73.6 h	2.1 d
H-44	6.7 b	72.4 j	2.2 c
$\bar{x}$	<u>6.9</u>	<u>73.1</u>	<u>2.1</u>
DSH	<u>0.81</u>	<u>1.08</u>	<u>0.13</u>

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).  $\bar{x}$ : media aritmética, DSH: diferencia significativa honesta.

La sincronía de la floración para formar la cruce simple (M-43xM-44) y la cruce trilínea, fue mejor en el H-66; es decir, la que está constituida por dos líneas Michoacán y una línea de diferente origen (M-52). En promedio la mayor asincronía fue de cinco días para las cruces simples hembras M-47xM-46 y M-55xM-54 progenitoras del H-44 y H-70;

en la formación de híbridos trilineales, la mayor asincronía fue de dos días en el H-70. Los progenitores de origen Michoacán, M-44, M-46, M-43 y M-54 presentaron mayor número de días a floración entre ambientes, debido a la sensibilidad de los genotipos ocasionada por el fotoperiodo y temperaturas templadas de los ambientes de evaluación COA y SLP (16 y 17 °C) que alargan las etapas de desarrollo y floración a diferencia de la temperatura (20 °C) de su lugar de origen (Craufurd y Wheeler, 2009).

Virgen-Vargas *et al.* (2014) reportaron valores similares de FM en M-44 y M-54 (87.7 y 87.6 días) al evaluar en Valles Altos de México. Los híbridos se comportaron más precoces, lo que se atribuye al vigor híbrido (Noriega-González *et al.*, 2011).

En general, las líneas hembras presentaron un REN mayor (500 kg), una FM de más precoz (2.9 días) así como también presentaron una AP mayor (40 cm) a diferencia de las líneas macho. Las cruza simples hembras presentaron un menor rendimiento (1800 kg) y fueron más precoces (1.3 días) a diferencia de los híbridos trilineales que presentaron 6.9 t ha<sup>-1</sup> en REN, 73.1 días de FM y 2.1 m de AP.

### **1.5.3 Estabilidad e interacción genotipo ambiente**

En el Cuadro 1.8 se muestra la prueba de Gollob que se usó para obtener la significancia de los componentes de IGA, con el modelo SREG para los progenitores e híbridos evaluados en los cinco ambientes. No obstante, que el análisis SREG mostró que los cinco componentes fueron significativos ( $p \leq 0.01$ ), los dos primeros explicaron el 94 % de la variación total debida a la interacción presente en la variable REN. Kandus *et al.* (2010) evaluó el rendimiento en líneas BLS (Sistema Letales Equilibrados) en cinco ambientes, y mediante el modelo S-REG obtuvo porcentajes de variación de interacción de 93 %, similares a los obtenidos en este estudio. Sin embargo, Setimela *et al.* (2010)

reportaron valores de 83 % en la estabilidad del rendimiento de híbridos y materiales elite evaluados en diferentes condiciones de fertilización, estrés por sequía y pH. Ahmadi *et al.* (2012) reportaron valores de 57 % al evaluar líneas avanzadas y variedades liberadas de trigo en multiambientes.

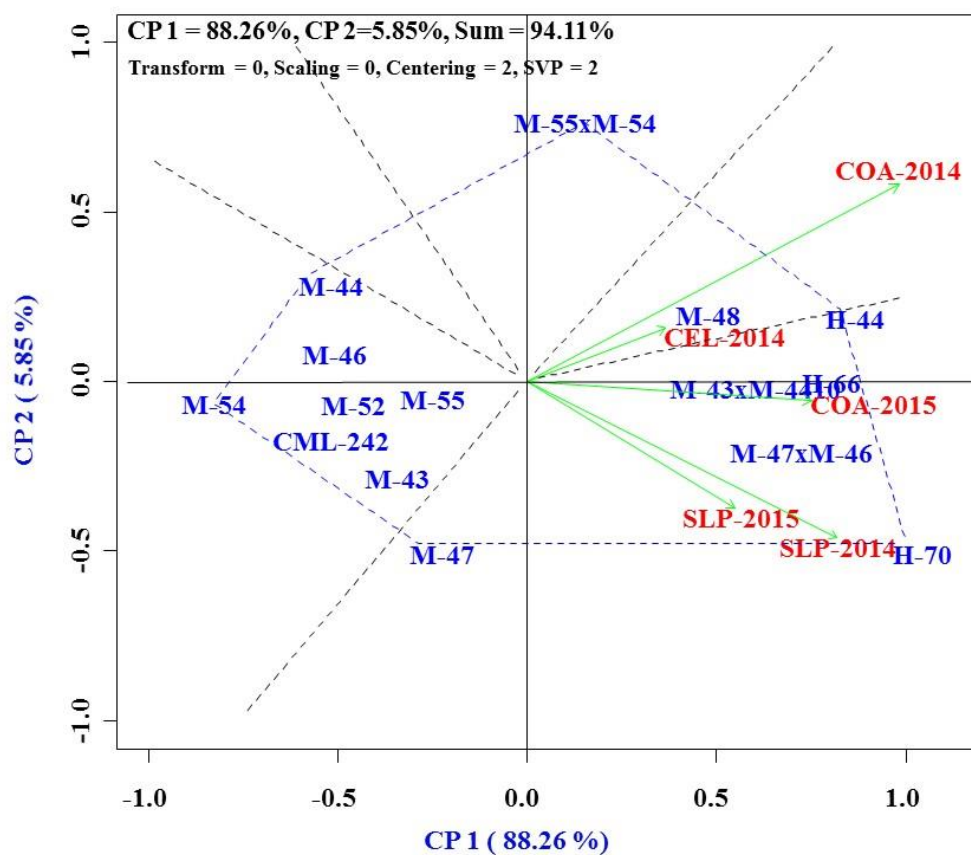
**Cuadro 1.8 Prueba de Gollob del modelo SREG, para el rendimiento de progenitores e híbridos evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	% Suma de cuadrados	Cuadrado medio
Modelo	74	1717.93		
Ambientes (A)	4	452.39	26.33	113.09**
Genotipos (G)	14	1027.14	59.78	73.36**
G*A	56	238.40	13.89	4.25**
CP1	17	1116.94	88.25	65.70**
CP2	15	73.99	5.84	4.93**
Residuo	33	74.6	5.89	6.65**

\*\*Significativo ( $p \leq 0.01$ ). CP1: componente principal 1, CP2: componente principal 2.

En la Figura 1.2, se observa el comportamiento de A, G y la IGA, donde los genotipos idóneos son los que presentan valores grandes en CP1 (REN promedio) y pequeños valores en CP2; muestra los dos primeros componentes, que explicaron el 94 % de la variación, cada genotipo representado por coordenadas, en un punto definido. Los ambientes se representan como vectores que parten del origen de la Figura 1.2; la longitud de los vectores se emplea para discriminar entre ambientes.

En la Figura 1.2 se destaca la ubicación de los cinco ambientes en dos sectores, donde se aprecia que el mejor, para la expresión del rendimiento, fue COA, seguido de SLP, por lo que la localidad de CEL fue la de menor rendimiento, por estar ubicada en un mega ambiente diferente, es decir con diferente altitud (1,765 msnm), temperaturas (29, 21 y 13 °C) y precipitación (461 mm).



**Figura 1.2 Biplot de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción representada mediante los dos primeros componentes principales del modelo SREG para rendimiento de semilla de progenitores e híbridos evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**



En cuanto a genotipos, se aprecian dos grandes grupos de clasificación, los híbridos trilineales (H-70, H-44 y H-66) y cruzas simples progenitoras (M-47xM-46, M-43xM-44 y M-55xM-54) ubicados en los cuadrantes I y IV, cuyo rendimiento fue superior al de las líneas progenitoras, ubicadas en los cuadrantes II y III. Esta respuesta se ha asociado con el fenómeno de heterosis, que se define como la superioridad en el rendimiento, crecimiento y vigor del híbrido sobre cualquiera de sus progenitores (Tollenaar *et al.*, 2004); además, se ha detectado que pueden ser efectos aditivos (Mendes *et al.*, 2003), entre otros. La línea M-48 es la excepción, debido a su vigor, producto de derivar líneas de la cruce entre genotipos con diferente origen geográfico (Valles Altos x clima templado y subtropical). Con estos resultados, es evidente que el modelo SREG permitió una diferenciación clara entre los genotipos con respecto a su rendimiento y estabilidad (Ahmadi *et al.*, 2012; Kandus *et al.*, 2010). Los híbridos H-70 y H-44, destacaron por sus mayores rendimientos en los ambientes COA y SLP, independientemente del año de evaluación, lo que se observa en el polígono, ya que se ubican en los vértices en los cuadrantes I y IV. Después de M-48, en COA 2014, la línea con mayor rendimiento fue M-55, en contraste con M-54, que presentó el menor valor; mientras que en SLP en los dos años de evaluación el menor valor fue para M-44 y el mayor para M-47, cabe destacar que M-47 no presentó una producción destacada en COA, lo cual resalta la importancia del ambiente en la producción de semilla. De los híbridos trilineales, el más estable fue el H-66; no obstante, cabe recordar que no fue el de mayor rendimiento. El H-44 mostró ser menos predecible que el H-66, mientras que el que más interaccionó con el ambiente fue el H-70, por lo que se puede considerar como un material inestable o poco predecible, pero con mayor repuesta a ambientes favorables. Estos resultados coinciden con la respuesta de las cruzas simples progenitoras hembra de cada uno de los híbridos. Las líneas con comportamiento predecible, clasificadas como

estables fueron la M-55, M-52 y M-54, mientras que, M-46, CML-242, M-43, M-44 y M-48 mostraron menor estabilidad, en tanto que M-47 se clasificó como un genotipo poco predecible o inestable.

En cuanto a la producción de semilla de las cruzas simples y de los híbridos trilineales, de acuerdo con estos resultados, se puede realizar en las localidades de Coatlinchán y San Luis de la Paz; sin embargo, en esta última localidad, en fechas de siembra de abril y mayo. De ser necesario, la multiplicación de semilla del M-48 sería factible realizarla en Celaya.

El modelo SREG explicó un alto porcentaje de la variabilidad de los datos y permitió observar un patrón claro de diferenciación entre las líneas y los híbridos a excepción de M-48, mostró que la CS hembra M-43xM-44, H-66 y las líneas M-52, M-55 y M-54 tuvieron un comportamiento estable en términos de rendimiento. Por otro lado, M-48 y M-46xM-47 fueron los genotipos que mostraron una adaptación específica a un ambiente. Asimismo, identificó los genotipos estables y los que se adaptan mejor a un entorno particular, lo que coincide con varios autores que también han utilizado el modelo para evaluar múltiples experimentos en la selección de líneas de trigo (Ahmadi *et al.*, 2012) y líneas e híbridos de maíz (Kandus *et al.*, 2010).

## **1.6 CONCLUSIONES**

La producción de semilla del progenitor M-43xM-44 y las líneas M-55, M-52 y M-54; así como el híbrido trilineal del H-66 se puede realizar en las localidades de Celaya y San Luis de la Paz, Guanajuato. La línea macho M-48, se puede producir con éxito en Celaya, y la CS hembra M-47xM-46 en San Luis de la Paz.

El híbrido H-70 se comportó de manera inestable o poco predecible, pero con mejor respuesta a ambientes favorables; la CS hembra M-55xM-54 y la línea femenina M-47 fueron poco predecibles o inestables.

La CS hembra M-47xM-46 progenitor del H-44, las líneas endogámicas femeninas M-47 y M-55, progenitores de los híbridos H-44 y H-70 respectivamente, presentaron un mayor rendimiento. La línea hembra con menor REN fue la M-43 progenitor del H-66. La línea macho de mayor REN fue la M-48 progenitora del H-44.

La sincronía de la floración de las líneas endogámicas, para formar las cruces simples, fue mejor en el H-66; sin embargo, su progenitor hembra M-43xM-44 y la línea M-43 presentaron la mayor altura de planta.

## 1.7 LITERATURA CITADA

- Ahmadi, J.; Mohammadi, A.; Najafi, M.T. 2012. Targeting promising bread wheat (*Triticum aestivum* L.) lines for cold climate growing environments using AMMI and SREG GGE biplot analyses. *Journal of Agricultural Science and Technology* 14: 645-657.
- Ambika, S.; Manonmani, V.; Somasundaram, G. 2014. Review on effect of seed size on seedling vigor and seed yield. *Research Journal of Seed Science* 7:31-38.
- Arellano-Vázquez, J.L.; Virgen-Vargas, J.; Ávila-Perches, M.A. 2010. H-66 híbrido de maíz para los Valles Altos de los estados de México y Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1:257-26.

- Arellano-Vázquez, J.L.; Virgen-Vargas, J.; Rojas-Martínez, I.; Ávila-Perches, M.A. 2011. H-70: Híbrido de maíz de alto rendimiento para temporal y riego del Altiplano Central de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:619-626.
- Burgueño, J.; Crossa, J.; Vargas, M. 2001. SAS Programs for graphing GE and GGE biplot. The AMMI analysis and graphing the biplot. Biometrics and Statistics Unit CIMMYT, Estado de México, Mexico.
- Castellanos, R.J.Z.; Cueto, W.J.A.; Macías, C.J.; Salinas, G.J.R.; Tapia, V.L.M.; Cortés, J.M.J.; González, A.I.J.; Mata, V.H.; Mora, G.M.; Vásquez, H.A.; Valenzuela, S. C.; Enríquez, S.A.R. 2005. La fertilización en los cultivos de maíz, sorgo y trigo en México. Folleto Técnico número 1. Campo Experimental Bajío. INIFAP. Celaya, Guanajuato, México. 42 p.
- CNA, Comisión Nacional del Agua. 2015. Servicio Meteorológico Nacional. <http://www.cna.gob.mx>. Acceso en: 4 de Noviembre, 2016.
- Craufurd, P.Q.; Wheeler, T.R. 2009. Climate change and the flowering time of annual crops. *Journal of Experimental Botany* 60:2529-2539.
- Crossa, J.; Cornelius, P.L. 2002. Linear-bilinear models for the analysis of genotype environment interaction. In: *Quantitative Genetics, Genomics, and Plant Breeding*. Kang, M.S. CABI Publishing, New York.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Production crops. 2013 <http://faostat.fao.org/beta/es/#data/QC/visualize>. Acceso en: 4 de Noviembre, 2016.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2016. Food Outlook. Biannual report on global food markets. <http://www.fao.org/giews/reports/food-outlook/es/>. Acceso en: 19 de Noviembre, 2017.

- García, M.P.J.; Cabrera, P.S.R.; Pérez, C.A.A.; Silva, D.R.J.; Álvarez, P.R.M.; Marín, R.C.A; Monasterio, P.P.; Santella, Q.M.D. 2009. Estabilidad del rendimiento y potencial agronómico de cultivares de maíz de endospermo normal y QPM en zonas agroecológicas de Venezuela. *Agronomía Tropical* 59:433-443.
- Gauch, Jr. H.G.; Zobel, R.W. 1997. Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science* 37:311–326.
- Gómez-Montiel, N.O.; Sierra-Macías, M.; González-Camarillo, M.; Cantú-Almaguer, M.A.; Ramírez-Fonseca, A.; Wong-Pérez, J.J.; Manjarrez-Salgado, M.; Ramírez-Díaz, J.L.; Espinosa-Calderón, A. 2008. H-562, Híbrido de maíz de alto rendimiento para el trópico húmedo y seco de México. *Agricultura Técnica México* 34:101-105.
- Kandus, M.; Almorza, D.; Boggio Ronceros, R.; Salerno, J.C. 2010. Statistical models for evaluating the genotype-environment interaction in maize (*Zea mays* L.). *Phyton* 79:39-46.
- Líra-Saldívar, R.H. 2007. *Fisiología Vegetal*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Editorial Trillas, 2ed, p. 141.
- Lozano-Ramírez, A.; Santacruz-Varela, A.; San-Vicente-García, F.; Crossa, J.; Burgueño, J. Molina-Galán, J.D. 2015. Modelación de la interacción genotipo x ambiente en rendimiento de híbridos de maíz blanco en ambientes múltiples. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38:337–347.
- Malvar, R.A.; Revilla, P.; Butrón, A.; Gouesnard, B.; Boyat, A., Soengas, P., Álvarez, A.; Ordás, A. 2005. Performance of crosses among french and spanish maize populations across environments. *Crop Science* 45:1052-1057.

- Márquez S.F. 1992. La interacción genético–ambiental en genotecnia vegetal. Revisión. En: Simposio interacción genotipo-ambiente en genotecnia vegetal. SOMEFI. Guadalajara, Jalisco, México, pp 1-27.
- Martínez-Sánchez, J.; Espinosa-Paz, N; Villegas-Aparicio, Y. 2016. Interacción genotipo por ambiente en poblaciones de maíz nativo de Chiapas. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 3:38-48.
- Mendes, A.A.; Carlini-Garcia, A.L.; Sesende, Da.S.A.; Figueiredo, S.; Franco, G.A.A.; Lops, De,S.C.Jr. 2003. Combining ability of inbred lines of maize and stability of their respective single-crosses. *Scientia Agricola* 60:83-89.
- Milošević, M.; Vujakovic, M.; Karagic, D. 2010. Vigour test as indicators of seed viability. *Genetika* 42:103-118.
- Noriega-González, L.A.; Preciado-Ortiz, R.E.; Enríquez E.A.; Terrón-Ibarra, A.D.; Covarrubias-Prieto, J. 2011. Fenología, crecimiento y sincronía floral de los progenitores del híbrido de maíz QPM H-374C. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:489-500.
- Pacheco, A.; Vargas, M.; Alvarado, G.; Rodríguez, F.; Crossa, J.; Burgueño, J. 2015. "GEA-R (Genotype x Environment Analysis with R for Windows) Version 2.0" <http://hdl.handle.net/11529/10203> International Maize and Wheat Improvement Center.
- Pecina-Martínez, J.A.; Mendoza-Castillo, M.C.; López-Santillán, J.A.; Castillo-González, F.; Mendoza-Rodríguez, M. 2009. Respuesta morfológica y fenológica de maíces nativos de Tamaulipas a ambientes contrastantes de México. *Agrociencia* 43: 681-694.
- Ruiz-Corral, J.A.; Medina-García, G.; Ramírez-Díaz, J.L.; Flores-López, H.E.; Ramírez-Ojeda, G.; Manríquez-Olmos, J.D.; Zarazúa-Villaseñor, P.; González-Eguiarte, D.R.; Díaz-Padilla, G.; De la Mora-Orozco, C. 2011. Cambio climático y sus implicaciones en

- cinco zonas productoras de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:309-323.
- SAS, Statistical Analysis System. 2000. Software Release V 8.1. SAS Institute Inc. Cary, N.C., USA.
- Setimela, P.S.; Vivek, B.; Bänziger, M.; Crossa, J.; Maiden, F. 2007. Evaluation of early to medium maturing open pollinated maize varieties in SADC region using GGE biplot based on the SREG model. *Field Crops Research Soil* 103:161-169.
- Setimela, P.S.; Crossa, J.; 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* 27:207-214.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2014. Estadística de la producción 2014. <http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/siap/Paginas/estadistica.aspx>  
Acceso en: 19 de Noviembre, 2017.
- Tollenaar, M.; Ahmadzadeh A.; Lee, E. A. 2004. Physiological basis of heterosis for grain yield in maize. *Crop Science* 44:2086-2094.
- Vázquez-Carrillo, M.G.; Rojas-Martínez, I.; Santiago Ramos, D.; Arellano-Vázquez, J.L.; Espinosa-Calderón, A.; García-Pérez, M.; 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.
- Virgen Vargas, J.; Zepeda Bautista, R.; Arellano Vázquez, J.L.; Ávila Perches, M.A. y Rojas Martínez, I. 2013. Producción de semilla de progenitores e híbridos de maíz de Valles Altos en dos fechas de siembra. *Revista de Ciencia y Tecnología Agropecuaria de México* 1:26-32.

- Virgen-Vargas, J.; Zepeda-Bautista, R.; Ávila-Perches M.A.; Espinosa-Calderón, A.; Arellano-Vázquez, J.L.; Gámez-Vázquez, A.J. 2014. Producción de semillas de líneas progenitoras de maíz: densidad de población e interacción. *Agronomía Mesoamericana* 25:323-335.
- Virgen-Vargas, J.; Zepeda-Bautista, R.; Ávila-Perches, M.A.; Espinosa-Calderón, A.; Arellano-Vázquez, J.L.; Gámez-Vázquez, A.J. 2016. Producción y calidad de semilla de maíz en Valles Altos de México. *Agronomía Mesoamericana* 27:191-206.
- Wang, B.; Zhang, Z.; Fu, Z.; Liu, Z.; Hu, Y.; Tang, J. 2016. Comparative QTL analysis of maize seed artificial aging between an immortalized F2 population and its corresponding RILs. *Crop Journal* 4:30–39.



## CAPÍTULO II

### INTERACCIÓN GENOTIPO AMBIENTE EN LA CALIDAD FÍSICA Y FISIOLÓGICA DE SEMILLAS DE PROGENITORES E HÍBRIDOS DE MAÍZ

#### 2.1 RESUMEN

La calidad es un parámetro importante en la producción de semilla, las condiciones ambientales del sitio de producción afectan la calidad. Para mantener y conservar la calidad de semilla de maíz se requiere de progenitores capaces de contrarrestar los cambios en los ambientes de producción. Por ello, el objetivo fue identificar la interacción genotipo-ambiente en las características de calidad física y fisiológica de líneas endogámicas y cruzas simples, progenitores de híbridos trilineales de maíz adaptados a Valles Altos de México. Durante el ciclo primavera-verano 2014 y 2015, se evaluaron 15 genotipos: nueve líneas (M-55, M-54, CML-242, M-43, M-44, M-52, M-46, M-47 y M-48), tres cruzas simples (M-55xM-54, M-43xM-44 y M-47xM-46) y tres híbridos (H-70, H-66 y H-44), en tres localidades: Coatlinchán (COA), Celaya (CEL) y San Luis de la Paz (SLP), México, en un diseño de bloques al azar con tres repeticiones. Se evaluaron características de calidad física y fisiológica. Se hicieron los análisis de varianza combinados, comparación múltiple de medias con Tukey ( $p \leq 0.05$ ) y para la interacción genotipo-ambiente se utilizó el modelo SREG. Las condiciones ambientales influyeron sobre las características de calidad física y fisiológica; en calidad física los mejores fueron SLP 2014 en peso de mil semillas (295.3 g), COA 2015 en peso hectolítrico (74.7 kg hL<sup>-1</sup>), COA 2014 y SLP 2014 en porcentaje de semilla comercial (76.0 y 73.3 %). Para calidad fisiológica en germinación estadísticamente todos los ambientes fueron iguales a excepción de CEL 2014 y en germinación después del estrés de frío SLP 2015 (82 %) fue el mejor ambiente. El

progenitor M-47xM-46 presentó estabilidad en calidad física y la M-43xM-44 en calidad fisiológica. El híbrido H-70 en general presentó la mejor respuesta para calidad física y fisiológica; sin embargo, es un genotipo poco predecible, con mejor comportamiento en ambientes favorables. Estos resultados proponen características de calidad física y fisiológica de menor interacción genotipo ambiente en las localidades de San Luis de la Paz y Celaya para la producción de semilla con calidad de progenitores de híbridos de maíz de Valles Altos de México.

**Palabras clave:** líneas, cruas simples, localidades, estabilidad, peso de mil semillas, peso hectolítrico, semilla comercial y germinación

**GENOTYPE ENVIRONMENT INTERACTION ON THE PHYSICAL AND  
PHYSIOLOGICAL QUALITY OF MAIZE SEEDS FROM PARENTS AND  
HYBRIDS**

**2.2 ABSTRACT**

Quality is an important parameter in seed production, and environmental conditions of a site affect quality. In order to maintain and preserve maize seed quality, parents capable of counteracting changes in the production environment are needed. Thus, the objective was to identify the genotype-environment interaction on the physical and physiological quality characteristics of endogamous lines and simple crosses that parent tri-linear maize hybrids adapted to the High Valleys of Mexico. During the spring-summer cycles in 2014 and 2015, 15 genotypes were evaluated: nine lines (M-55, M-54, CML-242, M-43, M-44, M-52, M-46, M-47, and M-48), three simple crosses (M-55xM-54, M-43xM-44, and M-47xM-46), and three hybrids (H-70, H-66 y H-44) in three locations: Coatlinchan (COA), Celaya (CEL), and San Luis de la Paz (SLP), Mexico, under a completely randomized block design with three replicates. Physical and physiological quality characteristics were evaluated. The following analyzes were done: combined variance and multiple mean comparison with Tukey ( $p \leq 0.05$ ); and the SREG model was used for the genotype-environment interaction. The environmental conditions influenced the physical and physiological quality characteristics. With regard to physical quality, the best were: SLP 2014 in the weight of a thousand seeds (295.3 g), COA 2015 in hectoliter weight (74.7 kg hL<sup>-1</sup>), and COA 2014 and SLP 2014 in percentage of commercial seeds (76.0 and 73.3 %). With respect to physiological quality in germination, all the environments were statistically equal, with the exception of CEL 2014, while SLP 2015 (82

%) was the best environment with respect to germination after cold stress. The M-47xM-46 parent showed stability in physical quality, while M-43xM-44 showed stability in physiological quality. The H-70 hybrid generally showed the best response in physical and physiological quality; however, it is an unpredictable genotype with better performance in favorable environments. These results suggest physical and physiological quality characteristics with lower genotype-environment interaction in the San Luis de la Paz and Celaya locations for seed production with quality parents of hybrid maize in the High Valleys of Mexico.

**Key words:** lines, simple crosses, locations, stability, weight of a thousand seeds, hectoliter weight, commercial seeds, germination

## 2.3 INTRODUCCIÓN

La producción de maíz en el mundo es de 1,039 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de 5.2 t ha<sup>-1</sup> (FAO, 2016). En México, el maíz es la base de la alimentación y se producen 22.25 millones de t de la producción mundial con rendimientos aproximados a 3.8 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2016). Entre otros factores, una de las alternativas para incrementar los rendimientos en nuestro país, es la adopción de semilla certificada; sin embargo, solamente se cubre el 30 % de la superficie sembrada con este cultivo (SIAP, 2013).

La semilla es uno de los insumos importantes en la producción, marca el comienzo de cada planta, garantizar su calidad es prioridad y requisito para obtener altos rendimientos en todas las especies vegetales (Milošević *et al.*, 2015). Se estima que aproximadamente el 80 % de los cultivos económicamente importantes se establecen con el uso directo o indirecto de semillas (Filho, 2015), de tal manera que cuidar la calidad de la semilla es importante.

La calidad de semilla se define como la suma de atributos genéticos, físicos, fisiológicos y sanitarios que afectan la capacidad para realizar funciones vitales, relacionadas con la germinación, vigor y la longevidad (Moterle *et al.*, 2011). La apariencia de la semilla representa la calidad física, que depende del tamaño, peso hectolítrico, brillantez, pureza analítica, ausencia de semillas de malezas comunes y nocivas, y de otros cultivos; y la calidad fisiológica está determinada por la viabilidad, germinación y vigor (Castañeda-Saucedo *et al.*, 2009).

En cualquier sistema de cultivo, la germinación y el vigor de la semilla son los atributos importantes de la calidad para asegurar la emergencia uniforme y el establecimiento de un cultivo (De Geus *et al.*, 2008); sin embargo, estos factores están muy

influenciados por las características físicas como el tamaño de la semilla (Sulewska *et al.*, 2014). El peso volumétrico y de mil semillas pueden considerarse como indicadores de la calidad, lo que se relaciona con el manejo agronómico y con las condiciones climáticas que se presentan durante el desarrollo del cultivo (Fernández-Sosa *et al.*, 2015); la calidad está altamente influenciada por factores ambientales como la temperatura (Abdullah *et al.*, 2001), humedad, fertilidad del suelo, nutrición de la planta madre y la presencia de patógenos (EnayatGholizadeh *et al.*, 2012), aspectos más comunes y de mayor efecto en la floración, maduración y cosecha.

La evaluación de progenitores desde el punto de vista de la calidad, en la producción de semilla es de suma importancia; así como, conocer el efecto ambiental en la calidad de la semilla en siembras de maíz, por lo que la prueba de germinación es parte importante en la producción de semilla, sin embargo, no muestra una alta correlación con la emergencia de plántulas en campo, pero es la prueba más rápida y más comúnmente utilizada para el etiquetado y garantía de venta de las semillas (De Geus *et al.*, 2008). Debido a la importancia de la calidad en la producción de semilla registrada y certificada de líneas y cruza simple progenitoras e híbridos de maíz; el objetivo del estudio fue determinar el efecto de la interacción genotipo-ambiente en las características de calidad física y fisiológica de líneas endogámicas y cruza simple, progenitoras de híbridos trilineales de maíz adaptados a Valles Altos de México.

## **2.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

Se evaluaron 15 genotipos, tres híbridos trilineales, sus líneas endogámicas y sus cruza simple progenitoras (Cuadro 1.1); en tres localidades: 1) Coatlinchán, (COA),

Estado de México, ubicada a 19°29'05" Latitud Norte, 98°53'11" Longitud Oeste y 2 250 metros sobre el nivel del mar (msnm); 2) San Luis de la Paz (SLP) ubicada a 20°34'40" Latitud Norte, 100°49'37" Longitud Oeste y 2 004 msnm; y 3) Celaya (CEL), Guanajuato ubicada a 21°13'11" Latitud Norte, 100°29'41" Longitud Oeste y 1 765 msnm. El tipo de suelo fue franco arenoso para las localidades de COA y SLP; y franco arcilloso para CEL. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, la parcela experimental fue de cuatro surcos de 5 m de largo y 0.80 m entre surcos, y se consideró como parcela útil, los dos surcos centrales. La siembra se realizó en el ciclo primavera-verano en el 2014 y 2015, en el último año no se estableció el ensayo en Celaya; por lo que se evaluaron cinco ambientes (COA 2014 y 2015, SLP 2014 y 2015 y CEL 2014), la densidad de población fue de 65,000 plantas por ha y se aplicó la dosis de fertilización: 150-70-00 de NPK, se utilizó como fuente de nitrógeno (N) sulfato de amonio y como fósforo (P) superfosfato de calcio triple, todo el P y la mitad del N se aplicó en la siembra y el resto en la segunda escarda de 35 a 40 días después de la siembra (dds). Los ensayos se establecieron bajo condiciones de riego se aplicó un riego de germinación y dos de auxilio, el primero a los 55-60 dds y el segundo a los 90 a 95 días. La maleza se controló con escarda mecánica y la aplicación de una mezcla de herbicida preemergente de Atrazina + S-metolaclor ( $2 \text{ L ha}^{-1}$ ) y una aplicación de herbicida postemergente de Foramsulfuron + Iodosulfuron metil sodio ( $150 \text{ g ha}^{-1}$ ), treinta días después de la emergencia del cultivo. El control de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) se realizó con la aplicación de Spinetoram ( $100 \text{ mL ha}^{-1}$ ) y una de Clorpirifos etil ( $1 \text{ L ha}^{-1}$ ).

La evaluación de la calidad física y fisiológica se realizó en el laboratorio de análisis de semillas del posgrado de Recursos Genéticos y Productividad del Colegio de Posgraduados, Campus Montecillos, y en las instalaciones del Campo Experimental Valle

de México del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias- (CEVAMEX-INIFAP), ambos ubicados en Texcoco, Estado de México.

Para el incremento de semilla se utilizó el método de polinización controlada o control manual, para lo cual en las plantas de los surcos orilleros de cada parcela experimental se cubrieron los jilotes antes de la emergencia de los estigmas y posteriormente se colectaba el polen de las espigas correspondientes. Para la producción de semilla de las líneas endogámicas se realizaron cruza fraternales entre plantas de la misma línea y para la formación de cruza simples o híbridos trilineales se polinizaron los estigmas del progenitor hembra con el progenitor macho correspondientes.

Para evaluar la calidad física, se utilizó el grano cosechado en cada parcela útil experimental, se determinó el peso de mil semillas (PMS) en gramos, se contaron y pesaron ocho repeticiones de 100 semillas por parcela experimental; se calculó la varianza, desviación estándar y coeficiente de variación (C.V.); si el valor del C.V. era menor del 4 % se consideraba correcto el dato y se obtuvo el PMS multiplicando la media aritmética de las repeticiones por 10 (ISTA, 2005), el peso hectolítrico (PH) se determinó en una báscula marca OHAUS® y se expresó en  $\text{kg hL}^{-1}$ ; el porcentaje de semilla comercial (%SC), se obtuvo al clasificar un kilo de semilla por parcela experimental con cribas de perforación redonda de 8, 7 y 6 mm de diámetro, se consideró como semilla comercial a la suma de semilla que era retenida por las cribas de 8 y 7 mm.

Para evaluar la calidad fisiológica de la semilla, se utilizó semilla proveniente del control manual de la polinización para el incremento de las líneas y formación de cruza simples e híbridos, que se efectuó en los surcos orilleros de cada parcela experimental. Se realizó mediante el porcentaje de germinación a través de la prueba de germinación estándar (%GPGE) y el porcentaje de germinación después de la prueba de frío (%GPF) de



acuerdo a las recomendaciones de la ISTA (2005), excepto que se utilizaron cuatro repeticiones de 25 semillas por parcela experimental; en ambas pruebas se usó el método entre papel que consiste en extender dos toallas sanitas (25x25 cm) humedecidas con agua destilada (cantidad equivalente a tres veces el peso del papel seco) sobre una superficie plana, en las cuales se colocaron 25 semillas, se orientaron los embriones hacia la parte inferior, distribuidas en cinco columnas y cinco hileras; posteriormente, las semillas se cubrieron con dos toallas húmedas, y se enrollaron en forma de “taco”. En la prueba de germinación estándar los rollos previamente identificados se depositaron en forma vertical en una bolsa de plástico y se ubicaron en un cuarto de germinación, a una temperatura de 25 °C. Siete días después se evaluó la germinación, se determinaron las plántulas normales con base en aquellas que tenían raíz, coleóptilo y hojas bien desarrolladas, sanas y sin malformaciones; y se expresó en porcentaje. En la prueba de frío los rollos se colocaron en un refrigerador por 7 días a 10 °C (Burris y Navratil, 1979), transcurrido este tiempo, se colocaron en el cuarto de germinación, a una temperatura de 25 °C. Siete días después se realizó la evaluación de la germinación, con la misma metodología que se utilizó para la prueba de germinación estándar. Los datos en porcentaje se transformaron mediante la función de arcoseno  $\sqrt[3]{x}$ , para normalizar la distribución y estabilizar las varianzas.

Se hizo un análisis de varianza combinado con un modelo mixto (SAS, 2000), considerando, los ambientes como efectos aleatorios y los genotipos como efectos fijos. Para la separación de medias, se utilizó la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). Se utilizó el modelo SREG para el análisis de interacción genotipo-ambiente (IGA), que integra el análisis de varianza y el de componentes principales, se usó el programa GEA-R (Pacheco *et al.*, 2015), que se basa en el modelo estadístico:

$$\bar{Y}_{ga} = \mu + \delta_a + \sum_{k=1}^t \lambda_k \alpha_{gk} \gamma_{ak} + \bar{\varepsilon}_{ga},$$

en donde:

$\bar{Y}_{ga}$  es la media del genotipo  $g$  ( $g = 1, 2, \dots, g$ ) en el ambiente  $a$  ( $a = 1, 2, \dots, a$ ) para los genotipos  $g$  y ambientes  $a$ ;  $\mu$  es la media general;  $\delta_a$  es el efecto del ambiente;  $\lambda_k$  son las constantes escalares que permiten la comparación ortogonal con el valor del vector singular de los genotipos, sitios  $\alpha_g$  y localidades  $\gamma_k$ ;  $\alpha_{gk}$  y  $\gamma_{ak}$  son los denominados efectos primarios, secundarios y terciarios del cultivar  $g$  en el ambiente  $a$ , respectivamente;  $\bar{\varepsilon}_{ga}$  es el error del modelo con distribución normal  $(0, \sigma^2/r)$ , e independiente, donde  $\sigma^2$  es la varianza del error y  $r$  es el número de repeticiones.

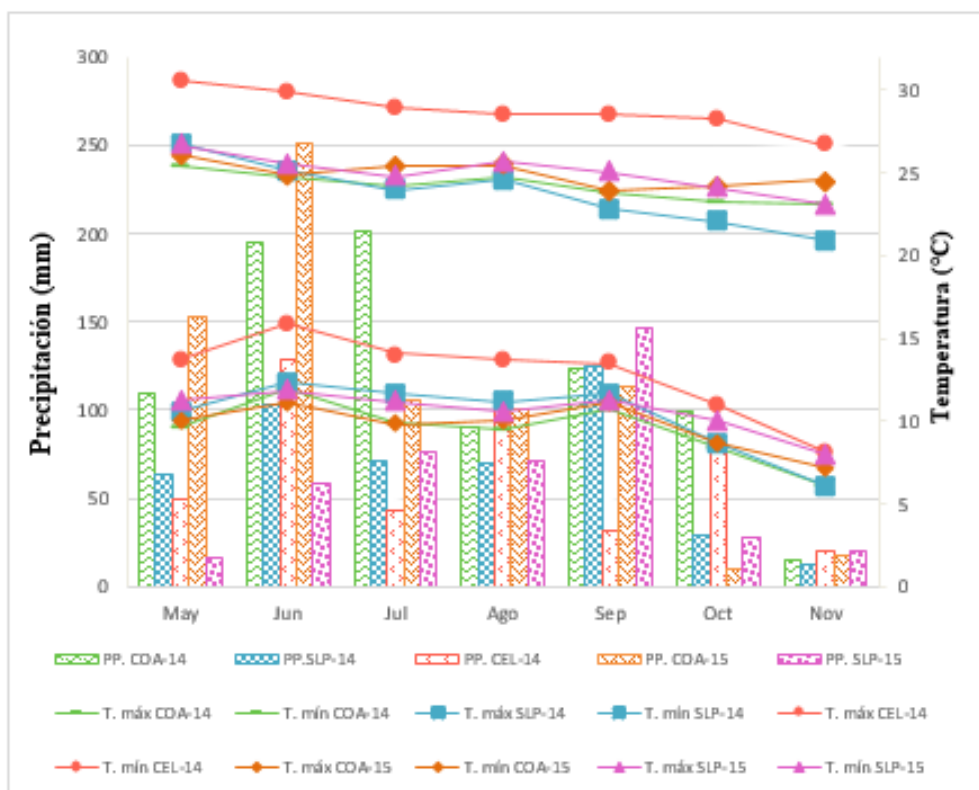
En el modelo SREG, el efecto principal de genotipo más la IGA, se asumen como términos lineales-bilineales (Crossa y Cornelius, 2002). Se representa por medio de una gráfica Biplot; donde los genotipos idóneos son los que presentan valores grandes en CP1 (valor promedio de la respuesta de la variable) y pequeños valores en CP2 (estabilidad) (Ahmadi *et al.*, 2012); los genotipos se representan por coordenadas, en un punto definido. Los ambientes se presentan como vectores que parten del origen de la figura; la longitud de los vectores se emplea para discriminar ambientes, indicando la variabilidad en la respuesta explicada por los ambientes, es decir, mayor longitud del vector indica mayor diferencia de la respuesta de los genotipos (Crossa *et al.*, 2015). Los sectores que dividen la figura forman los mega ambientes. Los genotipos que forman los vértices del polígono son los de mayor y menor respuesta, por lo tanto, los que más aportan a la interacción genotipo ambiente; el genotipo vértice más alejado del origen en cada sector es el de mayor

respuesta en los ambientes que se ubican en dicho sector. Los genotipos que se encuentran dentro de sectores sin ambientes, indican que no presentaron buen comportamiento en ningún ambiente. Un polígono biplot es la mejor manera de visualizar los patrones de interacción entre los genotipos y ambientes y de interpretar de manera efectiva un biplot (Yan y Kang, 2003).

## **2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **2.5.1 Condiciones climáticas de los ambientes de prueba**

Las localidades de producción se encuentran ubicadas en los mega-ambientes de Valles Altos (Coatlinchán), Zona de Transición (San Luis de la Paz) y El Bajío (Celaya). La localidad de Coatlinchán (COA) está ubicada a una mayor altitud (2,250 msnm) con una diferencia de 246 msnm de San Luis de la Paz (SLP) y 487 msnm que Celaya (CEL). El ambiente COA 2014 presentó la mayor precipitación con 834 mm a diferencia de CEL 2014 que fue más contrastantes al registrar la menor cantidad de precipitación (461 mm) entre los ambientes durante el ciclo del cultivo (Figura 2.1). La precipitación del ciclo agrícola 2015 fue inferior al 2014 para las localidades COA (9.8 %) y SLP (12.4 %). Las temperaturas fueron similares en los ambientes de COA y SLP con valores de 23.8-25.0 en temperaturas máximas y de 9.5-10.6 °C en temperaturas mínimas; a diferencia de CEL 2014 que registró el valor más alto de temperatura máxima (28.8 °C) y mínima (12.8 °C) (Figura 2.1). Los ambientes de Valles Altos y Zona de Transición presentan características climáticas similares a diferencia del ambiente de El Bajío que fue el más contrastante, en cuanto a mayor temperatura, precipitación, menor altitud y pH (7.65) moderadamente alcalino (Cuadro 1.2; 1.3 Capítulo I).



**Figura 2.1 Distribución de la precipitación y las temperaturas máximas y mínimas registradas durante el ciclo del crecimiento del cultivo en cinco ambientes. Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**

### 2.5.2 Análisis de varianza combinado y comparación de medias

En el Cuadro 2.1 se muestran los resultados del análisis de varianza combinado de las variables de peso de mil semillas (PMS), peso hectolítrico (PH), porcentaje de semilla comercial (%SC) y porcentaje de germinación en la prueba de germinación estándar (%GPGE), y prueba de frío (%GPF) observándose diferencias estadísticas ( $p \leq 0.01$ ), entre ambientes, genotipos (progenitores e híbridos) y la interacción entre genotipo x ambiente (IGA), para las variables evaluadas. Con base en la magnitud de los cuadrados medios, para

las variables de calidad física, la fuente de variación de mayor importancia fue para genotipos, seguida de ambientes y de la IGA. De la varianza total para la expresión de la variable PMS, el genotipo presentó una mayor importancia, al aportar 60.7 %, seguido por el efecto de ambiente con 32.1 % y la IGA con el 7.3 %. Para la expresión del PH, el genotipo determinó el 57.1 % de la varianza, seguido del 39.2 % del ambiente mientras que y la IGA aportó solo el 3.7 %. En la expresión del %SC el genotipo influyó 67.6 %, el ambiente 29.1 % y la IGA 3.4 %. En la calidad fisiológica (%GPGE y %GPF) a diferencia de la calidad física, la fuente de variación de mayor importancia fue para ambientes, seguida de genotipos y de la IGA. En el %GPGE, el ambiente presentó mayor importancia con 57.1 % de la varianza, el ambiente con 33.7 % y la IGA aportó el 9.2 %. En el %GPF el ambiente aportó el 76.9 %, seguido del genotipo con 21.1 % y 1.9 % de la IGA.

### **Ambientes**

En el análisis de prueba de medias entre los ambientes, se observaron diferencias estadísticas ( $p \leq 0.05$ ) para las variables de calidad física y fisiológica (Cuadro 2.2). En la calidad física, la mayor expresión fue para el PMS fue en el ambiente de SLP 2014, donde se presentó un valor menor de temperatura máxima en un rango de temperatura de 10.3 - 23.8 °C durante el ciclo del cultivo, a diferencia de CEL 2014 que fue el de menor PMS y el ambiente con mayor temperatura en un rango de 12.8 – 28.8 °C. En general, se observa que los ambientes que presentaron mejores condiciones para la expresión de PMS, fueron los que mostraron menores temperaturas, con una correlación entre la expresión de este carácter y la temperatura máxima entre ambientes de  $r=-0.80$ . En la expresión de PH entre ambientes, en el ambiente COA 2015 se registró el mayor PH (74.7 kg hL<sup>-1</sup>) y Celaya 2014

presentó el valor más bajo (70.0 kg hL<sup>-1</sup>), confirmándose la relación que existe entre las condiciones ambientales prevalecientes durante el desarrollo del cultivo y la expresión en la semilla (Fernández-Sosa *et al.*, 2015). Estos resultados se correlacionaron (0.65) con el %GPGE y %GPF (0.69).

**Cuadro 2.1 Cuadrados medios del análisis de varianza combinado y de los componentes principales del modelo SREG para las variables de calidad física y fisiológica de progenitores e híbridos de maíz evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**

F. V.	GL	Calidad física			Calidad fisiológica (% germinación)		
		PMS	PH	%SC	GL	%GPGE	%GPF
Ambiente (A)	4	10098.2**	136.1**	1095.8**	4	1012.6**	2313.5**
Genotipo (G)	14	19116.4**	198.3**	2548.7**	14	598.1**	635.3**
G*A	56	2284.6**	12.7**	126.6**	56	163.5**	127.5**
CP1	17	17174.8**	165.5**	5073.4**	17	507.0**	1315.8**
CP2	15	4118.2**	25.1**	409.8**	15	382.3**	460.3**
Residuo	33	3643	24.7	524.7	33	264.5	483.4
Error	140				210		
R <sup>2</sup>		0.8	0.9	0.9		0.6	0.8
C.V. (%)		9.2	2.5	12.3		9.5	10.4
$\bar{x}$		271.9	71.8	56.2		87.8	60.5

\*\*Significancia al 1% de probabilidad, F.V.: fuente de variación, GL: grados de libertad, PMS: peso de mil semillas, PH: peso hectolítrico, %SC: porcentaje de semilla comercial, %GPGE: porcentaje de germinación en la prueba de germinación estándar, %GPF: porcentaje de germinación en la prueba de frío, R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación, C.V.: coeficiente de variación,  $\bar{x}$ ; media aritmética.

En general, los ambientes de Valles Altos y Zonas de Transición presentaron los valores más altos (71.2 - 74.7 kg hL<sup>-1</sup>) a diferencia del ambiente de El Bajío, respuesta que

se correlacionó con la temperatura media (9, 10 y 12 °C) de los ambientes  $r=-0.92$ ; valores similares han sido reportados en híbridos por Virgen *et al.* (2013) a diferencia de valores de  $78.7 \text{ kg hL}^{-1}$  en semilla de híbridos, reportados por Pérez-Mendoza *et al.* (2006) en ambientes de Valles Altos. Para la variable %SC, en el ciclo 2014 se presentaron los valores altos (65.1 – 73.3 %) y los mejores ambientes fueron COA 2014 y SLP 2014; el tamaño de la semilla, lo determina el entorno de producción, las prácticas de cultivo y genética de las variedades, ya que por ejemplo, la semilla grande tiene un mejor rendimiento que la semilla pequeña (Adebisi *et al.*, 2011; Ambika *et al.*, 2014); pues el desarrollo de la semilla es dependiente de la acumulación de materiales nutritivos, correlacionados directamente con el vigor, es decir, con el tamaño y la masa de la semilla (Milošević *et al.*, 2015); de esta manera los nutrientes almacenados en la semilla proporcionan los elementos necesarios para el establecimiento de plántulas. Sin embargo (Pérez-Mendoza *et al.*, 2006) menciona que la calidad de la semilla depende principalmente del potencial genético del genotipo.

La expresión de la calidad fisiológica presentó diferencias estadísticas ( $p \leq 0.05$ ), mediante el %GPGE, donde el ambiente de SLP 2015 (91%) presentó los valores más altos; sin embargo, estadísticamente fue igual a los ambientes de SLP 2014, COA 2014 y 2015, a diferencia de la localidad de Celaya que presentó los porcentajes más bajos (81% y 57 %) en germinación en la prueba estándar y prueba de fría. La respuesta a la expresión de %GPF se correlacionó negativamente principalmente con la temperatura promedio mínima ( $r= -0.89$ ) y con la altitud de las localidades (msnm) con  $r= 0.81$ .

**Cuadro 2.2 Prueba de medias entre los ambientes de evaluación para variables de calidad física y fisiológica de progenitores e híbridos de maíz evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**

Ambiente	Calidad Física			Calidad fisiológica (% de germinación)	
	Peso de mil semillas (g)	Peso hectolítrico (kg hL <sup>-1</sup> )	Semilla Comercial (%)	Prueba de germinación estándar	Prueba de frío
SLP 2014	295.3a	71.4b	73.3a	87a	76c
COA 2015	272.5b	74.7a	62.0b	90a	80b
COA 2014	270.4b	71.2b	76.0a	90a	76c
SLP 2015	267.8c	72.2b	61.0b	91a	82a
CEL 2014	253.7d	70.0c	65.1b	81b	57d
DSH	14.58	1.06	6.03	4.20	4.12

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). SLP: San Luis de la Paz, COA: Coatlínchán, CEL: Celaya, DSH: diferencia significativa honesta.

Es importante mencionar que la prueba de germinación estándar es la más utilizada para el etiquetado de semillas para la venta (De Geus *et al.*, 2008); se recomienda realizarla en condiciones ideales; sin embargo, es mala predictora de la emergencia en campo porque se realiza bajo condiciones ambientales favorables (Shah *et al.*, 2002), pero es punto de referencia para la comercialización de semillas, para comparar la calidad fisiológica de los lotes y determinar la tasa de siembra, permitiendo obtener resultados comparables entre proveedores de laboratorios y compradores de semilla (ISTA, 2004). En el porcentaje de germinación en la prueba de frío, el ciclo 2015 presentó los mejores valores, y el ambiente de SLP 2015 tuvo el mayor promedio (82 %) y el ambiente CEL 2014 (57 %) presentó los porcentajes bajos en germinación. La respuesta de la expresión de %GPF, se correlacionó con los parámetros de temperatura máxima ( $r = -0.87$ ) y con la altitud de las localidades



( $r=0.73$ ), lo que coincidió con los parámetros de correlación del %G PGE, pero con diferente grado de correlación. La germinación, vigor y viabilidad son altamente influenciadas por factores ambientales en el campo (Jyoti y Malik, 2013), y son los atributos importantes de la calidad de la semilla, se realizan bajo condiciones de estrés (prueba de frío), para asegurar la emergencia uniforme y el establecimiento del cultivo (De Geus *et al.*, 2008). En general, las mejores condiciones para la expresión de estos caracteres se presentaron en los ambientes de Valles Altos (Coatlinchán) y Zonas de Transición (San Luis de la Paz) correlacionándose negativamente con la temperatura; derivado de daño fisiológico provocado por el factor temperatura que los genotipos no lograron amortiguar, afectado los procesos fisiológicos de las plantas y en consecuencia provocando daños a la semilla (Líra-Saldivar, 2007).

## **Genotipos**

### ***Calidad física de semilla de progenitores de híbridos de maíz.***

En las líneas endogámicas hembra (Cuadro 2.3), la de mayor PMS fue la M-55, progenitor femenino de la cruce simple hembra (CSH) del H-70, con 247.2 g; valores más altos (292.02 g) han sido reportados en esta línea progenitora de híbridos de maíz en Valles Altos de México (Virgen-Vargas *et al.*, 2014). La hembra de menor PMS fue la M-47 progenitor de H-44. De las seis líneas macho, la de mayor PMS fue la M-48 (286.5), progenitora del H-44, seguida de la M-46 y M-54; las líneas macho con menor PMS fueron la M-52 y M-44. La línea hembra M-47 expresó mayor peso hectolítrico ( $74.1 \text{ kg hL}^{-1}$ ), seguida de la M-55 y M-43, y la línea macho M-48 presentó mayor PH ( $75.9 \text{ kg hL}^{-1}$ ), superando a sus similares. Virgen-Vargas *et al.* (2016), en líneas progenitoras de híbridos en

Valles Altos en la localidad de Tlaxcala reporta un PH inferior ( $71.75 \text{ kg hL}^{-1}$ ) a los obtenidos en esta evaluación. Para la variable semilla comercial, la línea macho M-44 progenitora de la CSH del H-66 presentó el mayor valor de %SC (82.4 %), esta variable presentó una correlación alta ( $r=0.75$ ) con el PMS.

La CSH M-43xM-44 superó en PMS (311.9 g), a sus similares del H-70 y H-44. En la producción de semilla híbrida el número de semillas por kilogramo es importante para determinar la densidad de población de progenitor hembra y macho (Virgen-Vargas *et al.*, 2014). La M-47xM-46 ( $73.0 \text{ kg hL}^{-1}$ ) presentó el mayor valor de PH y la M-55xM-54 (83.4 %) superó a sus similares en %SC con un 8 y 10 %. De las líneas hembra y la CSH de mayor expresión fueron las progenitoras del híbrido H-70, seguida del H-66 y finalmente el H-44.

El H-70 presentó el mayor peso de semilla (319.0 g) y el más alto %SC (86.5 %); el PMS es un indicador del tamaño de semilla. El H-44 ( $76.5 \text{ kg hL}^{-1}$ ) obtuvo el mayor PH, seguido del H-70 y H-66. Vázquez *et al.* (2012) al evaluar la calidad de maíz para la industria de la masa y la tortilla en híbridos y variedades en localidades de Valles Altos Centrales de México, reportaron PH inferiores ( $74.1 \text{ kg hL}^{-1}$ ), al obtenido en este trabajo para el H-70.

**Cuadro 2.3 Comparación de variables de calidad física y fisiológica de progenitores e híbridos de maíz evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**

Genotipo	Calidad Física			Calidad Fisiológica (% de germinación)	
	Peso de mil semillas (g)	Peso hectolítrico (kg hL <sup>-1</sup> )	Semilla Comercial (%)	Germinación estándar	Prueba Fría
M-43	243.1g	69.3j	48.6d	84.7e	67.9g
M-47	222.3h	74.1d	20.3e	89.0c	71.2f
M-55	247.2f	70.3i	55.8d	88.3c	68.4g
M-48	286.5d	75.9b	73.8b	90.4c	82.7a
M-46	266.6e	68.5k	79.3b	83.2f	71.4f
M-54	250.5f	64.0m	71.7c	78.1g	56.6i
M-52	214.1i	71.0h	29.4e	87.3c	75.6d
M-44	243.6g	66.5l	82.4b	86.4d	68.6g
CML-242	250.3f	72.9e	73.9b	76.0h	65.4h
M-47xM-46	295.4c	73.0e	74.8b	89.4c	72.9e
M-43xM-44	311.9b	72.6f	76.4b	91.8c	81.1b
M-55xM-54	305.2b	72.6g	83.4b	92.6b	78.9c
H-44	313.9b	76.5a	75.0b	94.6a	84.2a
H-66	309.4b	75.0c	81.1b	92.0c	82.0a
H-70	319.0a	76.0b	86.5a	94.0a	84.5a
DSH	31.55	2.30	13.06	9.08	8.92

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). DSH: diferencia significativa honesta.

***Calidad fisiológica de semilla de progenitores de híbridos de maíz.***

En la prueba de germinación estándar (Cuadro 2.3) la línea hembra de mayor germinación fue la M-47 (89 %), y de las líneas endogámicas macho, la M-48 (90 %), progenitores del H-44; las líneas macho CML-242 (76 %) y M-54 (78 %) presentaron los valores más bajos de germinación, respuesta asociada a los primeros signos de desorganización y pérdida de la integridad del sistema de la membrana celular causado por la peroxidación de lípidos reduciendo así el potencial fisiológico de la semilla (Filho,

2015); como consecuencia de la depresión endogámica por el aumento de la frecuencia de los homocigotos (De Farías y Miranda, 2000) a diferencia de los híbridos.

En el %GPF la línea hembra M-47 (71 %) y la línea macho M-48 (83 %), progenitores del H-44 mostraron los mayores valores coincidiendo con la %GPGE; considerándose como genotipos con buen potencial fisiológico para realizar sus funciones vitales, en condiciones ambientales favorables y desfavorables (Filho, 2015).

La CSH del H-70 superó a sus similares, H-44 y H-66, en %GPGE; y la M-43xM-44 (81 %) en %GPF. En la producción de semilla el criterio de germinación estándar en laboratorio al momento de la certificación para líneas se realiza de acuerdo a las inspecciones y tolerancias de campo y la calidad de la línea es responsabilidad del productor; para la producción de semilla de líneas, cruzas simples e híbridos en la categoría básica, registrada y certificada es aceptado como mínimo el 90 % de germinación, de acuerdo a los resultados de la evaluación todos los genotipos cumplen con este criterio a excepción de la M-47xM-46 (SNICS, 2013). En relación a los híbridos el H-44 y H-70 sobresalieron en comparación a H-66 en %GPGE y %GPF.

Considerando los valores promedios de la germinación estándar de los genotipos en los cinco ambientes (Cuadro 2.3); los progenitores M-48, M-43xM-44, M-55xM-54 y los híbridos H-44, H-66 y H-70 cubren con el porcentaje de germinación requerido en la norma de certificación de semillas básica, registrada y certificada (90 %) del SNICS. Sin embargo, en el resto de los genotipos evaluados es importante considerar el porcentaje de germinación de acuerdo a la estabilidad de los materiales y al comportamiento específico del ambiente favorable. La prueba de frío es una prueba no estandarizada, sin embargo, de acuerdo a la ISTA (1981) y la AOSA (1983) la prueba de frío es considerada como la más importante para el vigor de la semilla de maíz. Grabe (1976) reportó que entre el 70% y el

80% de las plántulas normales resultantes eran niveles adecuados de calidad para lotes de semillas comerciales; los híbridos H-44, H-66 y H-70 presentan valores superiores (84.2, 82.0 y 84.5 %) al 80 % de germinación en la prueba de frío.

### 2.5.3 Estabilidad e interacción genotipo ambiente

Al descomponer la suma de cuadrados de la IGA en componentes principales (CP), el análisis SREG mostró cinco componentes de los cuales los tres primeros fueron significativos ( $p \leq 0.01$ ) para las variables PMS, PH, SC, %GPGE %GPF; sin embargo, con los dos primeros componentes (Cuadro 2.1) se explica la mayor parte del porcentaje de la variación total, al acumular valores mayores a 75 % (Crossa, 1990), por lo que se consideran parámetros válidos para el estudio de la estabilidad de híbridos de maíz (Vázquez-Carrillo *et al.*, 2012a). En los biplots se observa el comportamiento de A, G y la IGA, donde los ambientes se representan como vectores que parten del origen de la Figura; la longitud de los vectores se emplea para discriminar entre ambientes, y donde los genotipos idóneos son los que presentan valores grandes en CP1 y pequeños valores en CP2.

**Peso de mil semillas (PMS).** En la Figura 2.2a se muestra los dos componentes de mayor importancia que explican el 89.43 % de la variación total, debida a la interacción expresada en PMS; los ambientes se concentraron en dos sectores (mega-ambientes), el sector uno, ubicado en el cuadrante I y IV, que concentran cuatro ambientes, el mejor ambiente fue SLP 2014 a diferencia de CEL 2014 que fue la de menor PMS, posicionándose en un sector diferente al resto de los ambientes, respuesta asociada a la altitud, temperatura y precipitación contrastante a diferencia del resto de los ambientes. En lo que respecta a genotipos se aprecian dos grupos de clasificación, considerando a los

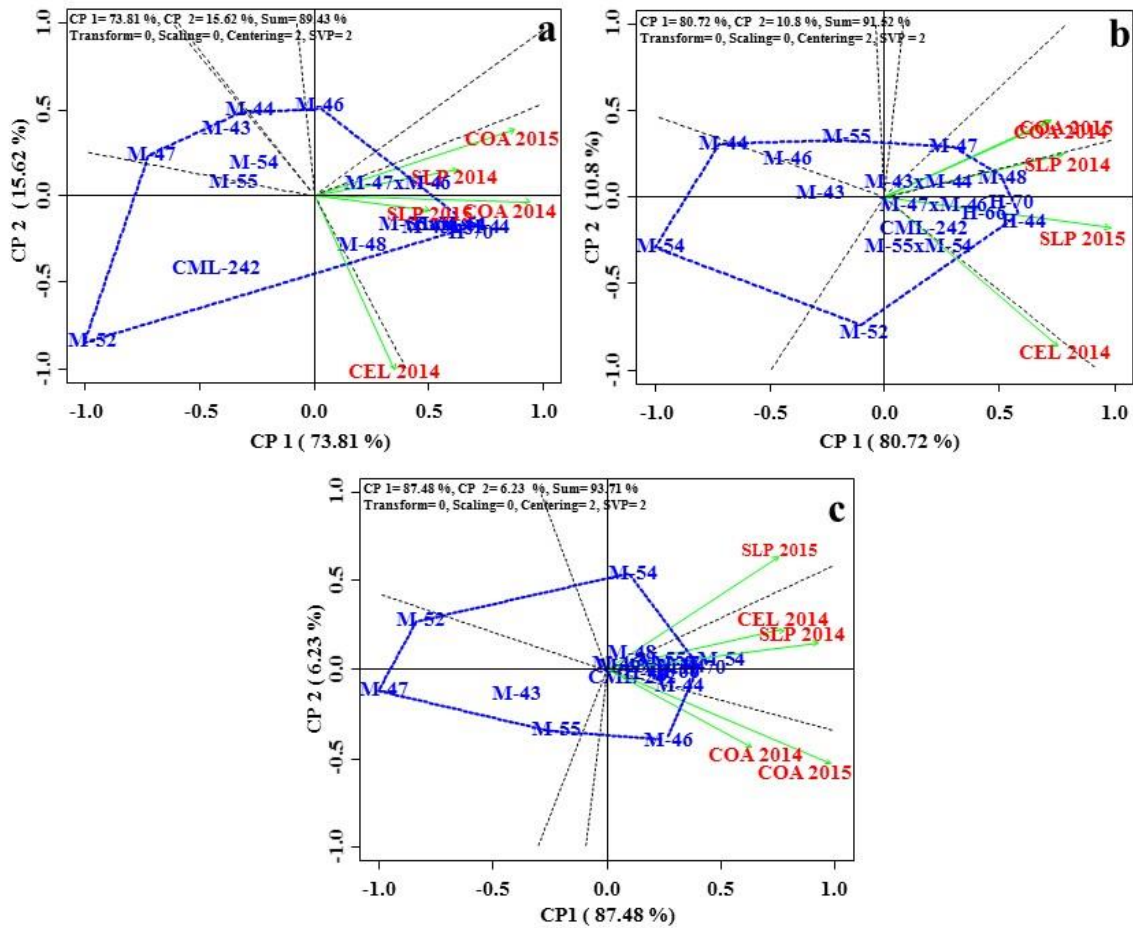
híbridos trilineales (H-70, H-44 y H-66), cruza simple progenitoras (M-47xM-46, M-43xM-44 y M-55xM-54) y la línea M-48 como primer grupo, ubicados en el primer sector; y a las líneas progenitoras restantes ubicadas en los sectores 2, 3, 4, 5 y 6. La respuesta de la expresión de la línea M-48 se asoció a su vigor, como resultado de derivar líneas de la cruce entre genotipos con diferente origen geográfico (Valles Altos x clima templado y subtropical); la respuesta del segundo grupo (líneas endogámicas), se relaciona al efecto negativo de la consanguinidad con la reducción de la media de los caracteres cuantitativos, como consecuencia de los alelos deletéreos recesivos conocida como depresión endogámica (De Farías y Miranda, 2000). Los genotipos más estables en PMS fueron la cruce simple M-47xM-46 y la línea M-55; y los más inestables fueron las líneas M-52 y CML-242, por su lejanía del CP2.

El genotipo vértice de mayor PMS fue el H-70 (319 g), en el mega ambiente que conformaron las localidades de Coatlinchán y San Luis de la Paz. Los genotipos H-66, H-44, M-43xM-44 y M-55xM-54 presentaron adaptación específica a SLP 2015, en respuesta a que las condiciones de temperatura y altitud fueron similares al ambiente para el que fueron generadas (Valles Altos) a diferencia de CEL. La línea M-52 (214.1 g) superó a CML-242 en PMS en la localidad de CEL 2014; las líneas M-46, M-44, M-43 y M-54 no presentaron buen comportamiento en ningún ambiente.

**Peso hectolítrico (PH).** En la Figura 2.2b los ambientes se concentraron en tres sectores (mega-ambientes), el mejor ambiente fue COA 2015 y COA 2014 con un comportamiento similar a diferencia de CEL 2014 que presentó el menor PH (70 kg hL<sup>-1</sup>). La respuesta de los genotipos de manera general, se comportaron, con una mayor distribución al de la expresión del PMS, la línea hembra M-47 y CML-242, se concentraron en el grupo uno

(cruza simple hembra, línea progenitora macho M-48 y los híbridos). El genotipo vértice de mayor PH ( $76.5 \text{ kg hL}^{-1}$ ) fue el H-44, en la localidad de San Luis de la Paz. Los genotipos más estables fueron el H-70, M-48, M-47xM-46, M-43xM-44 y M-43. Los resultados concuerdan con los obtenidos por Vázquez-Carrillo *et al.*, (2012), para el híbrido H-70, al evaluar el efecto de IGA en características físicas del grano en 20 híbridos en localidades de Valles Altos de Tlaxcala México. El genotipo M-47 mostró un comportamiento específico a los ambientes COA 2014 y COA 2015; el H-44 y H-66 a SLP 2015; el CML-242 y M-55xM-54 a CEL 2014. Los genotipos más inestables fueron las líneas M-52; y M-54, M-44, M-46 y M-55, que no presentaron buen comportamiento en los ambientes evaluados.

**Semilla Comercial (SC).** En la Figura 2.2c los ambientes se concentraron en tres sectores (mega-ambientes), el mejor ambiente fue COA 2014 a diferencia de SLP 2015 que presentó el menor %SC. En cuanto a la respuesta de los genotipos, de manera general no se observó una diferenciación entre genotipos; ya que las líneas M-48, M-54 y CML-242 se agruparon con las cruza simples e híbridos trilineales. Los genotipos de mayor aportación a la interacción genotipo ambiente fueron H-70 (86.5%), M-46 (68.5 %), M-55 (55.8 %), M-47 (20.3 %), M-52 (29.4 %) y M-54 (71.7%). Los genotipos más estables fueron el H-66, M-43xM-44, H-44, CML-242, M-47xM-46 y M-55xM-54. El genotipo H-70 presentó el mayor valor en los ambientes SLP 2014 y CEL 2014; el genotipo M-46 mostró un comportamiento específico al ambiente COA 2014. El genotipo más inestable fue la línea M-54; y las líneas M-55, M-43, M-47 y M-52 no presentaron buen comportamiento.

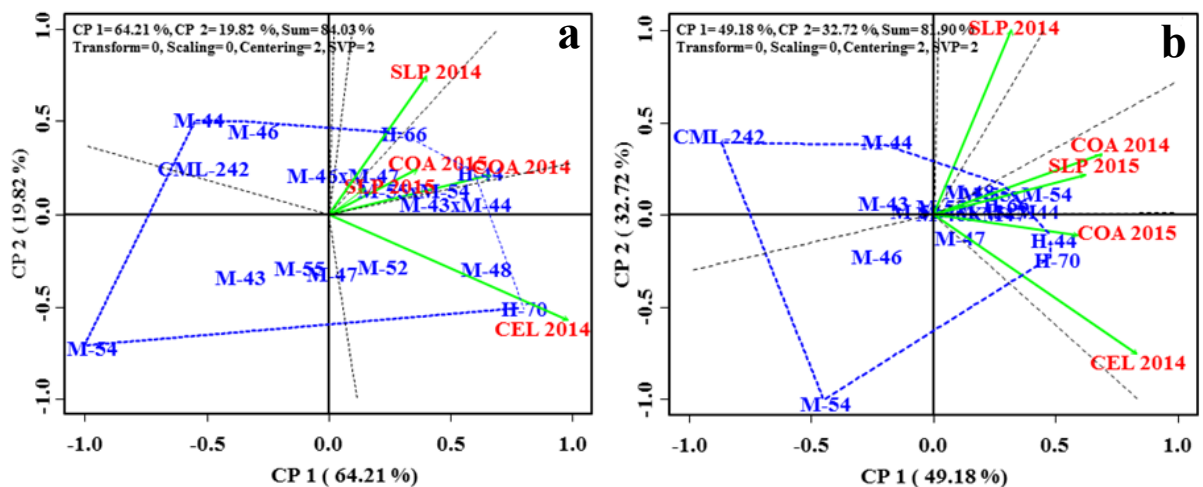


**Figura 2.2** Biplots de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción usando los dos primeros componentes principales del modelo SREG para calidad física: peso de mil semillas (a), peso hectolítrico (b) y semilla comercial (c) en la producción de semilla de progenitores e híbridos de maíz evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.

**Porcentaje de germinación estándar (%GPGE).** En la Figura 2.3a se observa que los ambientes, se concentraron en tres sectores (mega-ambientes), donde el mejor ambiente fue



SLP 2015 a diferencia de CEL 2014. Los genotipos que más aportaron a la interacción genotipo ambiente fueron el H-44 (94.6 %), H-70 (94.0 %), M-54 (78.1 %), CML-242 (76.0 %), M-44 (86.4 %) y M-55xM-54 (92.6 %). Los genotipos más estables fueron M-47xM-46, M-43xM-44, H-66, M-55 y M-52; y los más inestables M-54 y CML-242. La cruz M-55xM-54 presentó mayor germinación que la M-43xM-44, M-47xM-46 y el híbrido H-66 en los ambientes COA 2014 y SLP 2015. El genotipo vértice, H-44 y H-70 presentaron mayor germinación que M-47 en COA-15 y CEL-14.



**Figura 2.3** Biplots de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción usando los dos primeros componentes principales del modelo SREG porcentaje de germinación estándar (a) y después de prueba fría (b) en la producción de semilla de progenitores e híbridos de maíz evaluados en cinco ambientes del Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.

El genotipo M-55 mostró un comportamiento específico a SLP 14 y M-47 a CEL 2014. Los genotipos M-54, CML 242, M-46 y M-44 no presentaron buen comportamiento

en los ambientes por mostrar valores pequeños en CP1 (porcentaje de germinación) y grandes valores en CP2 (inestabilidad).

**Porcentaje de germinación después prueba fría (%GPF):** En la Figura 2.3b los ambientes se concentraron en tres mega-ambientes, observándose que el mejor ambiente fue SLP 2015 a diferencia de CEL 2014 que presentó mayor variación así como los valores más bajos; no se observó una diferenciación bien definida en la distribución de respuesta entre híbridos y líneas en el Biplot. Los genotipos que presentaron mayor aportación a la interacción genotipo ambiente fueron H-70 (84.5 %), M-54 (56.6 %), M-44 (68.6 %), H-66 (82.0 %) y H-44 (84.2 %). El genotipo más estable en la tolerancia al frío fue M-43xM-44, por su mayor resistencia de siembra en suelos con temperaturas bajas (10 °C) a diferencia del resto de los genotipos. El híbrido H-70 presentó el mayor porcentaje de germinación después del estrés de frío en CEL 2014; el genotipo M-55xM-54 mostró un comportamiento específico al ambiente COA 2014 y el genotipo más inestable fue la línea M-54.

## 2.6 CONCLUSIONES

Las condiciones ambientales influyeron sobre las características de calidad física y fisiológica de progenitores de maíz, especialmente sobre el peso de mil semillas y la germinación después del estrés de frío.

El progenitor M-47xM-46 presentó estabilidad en calidad física y M-43xM-44 fue el más estable en calidad fisiológica, por lo que se puede realizar la producción de semilla de estos progenitores en las localidades de San Luis de la Paz y Celaya, Guanajuato. Los progenitores M-43xM-44, M-55xM-54, CML-242 y los híbridos H-44 y H-66 fueron

estables en el porcentaje de semilla comercial. Los progenitores M-47xM-46, M-55, M-52 y el híbrido H-66 presentaron estabilidad en germinación estándar. El híbrido H-70 en general presentó la mejor respuesta para calidad física y fisiológica; sin embargo, se comportó como un híbrido poco predecible, con mayor respuesta a ambientes favorables.

La producción de los híbridos H-66 y H-44, se sugiere realizarla en localidades con altitudes de 2,000 msnm, ya que mostraron estabilidad específica al ambiente SLP 2015, en peso hectolítrico y de mil semillas.

## 2.7 LITERATURA CITADA

- Abdullah, Z.; Khan, M.A.; Flowers, T.J. 2001. Causes of sterility in seed set of rice under salinity stress. *Journal Agronomy & Crop Science* 187:25-32. DOI: 10.1046/j.1439-037X.2001.00500.x.
- Adebisi, M.A.; Kehinde, T.O.; Ajala, Olowu, E.F.; Rasaki, S. 2011. Assessment of seed quality and potential longevity in elite tropical soybean (*Glycine Max L.*) Merrill grown in Southwestern Nigeria. *Nigeria Agricultural Journal* 42:94-13.
- Ahmadi, J.; Mohammadi, A.; Najafi, M.T. 2012. Targeting promising bread wheat (*Triticum aestivum L.*) lines for cold climate growing environments using AMMI and SREG GGE biplot analyses. *Journal of Agricultural Science and Technology* 14: 645-657.
- Ambika, S.; Manomani, V.; Somasundaram, G. 2014. Review on effect of seed on seedling vigour and seed yield. *Research Journal of Seed Science* 2:31-39. DOI: 10.3928/rjss.2014.31.38

- Burris, J.S. and Navratil, R.J. 1979. Relationship between laboratory cold-test methods and field emergence in maize inbreds. *Agronomy Journal* 71:985-988.
- Castañeda-Saucedo, M.C.; López-Castañeda, C.; Colinas-De León, M.T.B.; Molina-Moreno, J.C.; Hernández-Livera, A. 2009. Rendimiento y calidad de la semilla de cebada y trigo en campo e invernadero. *Interciencia* 34:286-292.
- Crossa, J. 1990. Statistical analyses of multilocation trials. *Advances in Agronomy*. 44:55-85. doi:10.1016/S0065-2113(8)60818-4
- Crossa, J.; Cornelius, P.L. 2002. Linear-bilinear models for the analysis of genotype-environment interaction. In: KANG, M.S. *Quantitative Genetics, Genomics and Plant Breeding*. CABI Publishing, New York.
- Crossa, J.; Vargas, M.; Cossani, C.M.; Alvarado, G.; Burgueño, J.; Mathews. K.L.; Reynolds, M.P. 2015. Evaluation and interpretation of interactions. *Agronomy Journal* 107:736-747. DOI:10.2134/agronj2012.0491.
- De Farias, N.A.L.; De Miranda, F.J.B. 2000. Inbreeding in two maize subpopulations selected for tassel size. *Scientia Agricola* 57:487-490.
- De Geus, Y.N.; Goggi, S.A.; Pollak, L.M. 2008. Seed quality of high protein corn lines in low input and conventional farming systems. *Agronomy for Sustainable Development* 28:541-550. DOI: 10.1051/agro.2008023.
- EnayatGholizadeh, M.R.; Bakhshandeh, A.M.; Shoar D.M; Ghaineh, M.H.; Alami S.K.H.; Sharafizadeh M. 2012. Effect of source and seed size on yield component of corn S.C704 in Khuzestan. *African Journal of Biotechnology* 11:2938–2944. DOI: 10.5897/AJB11.2720.

- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2016. Production crops. Disponible en: <<http://faostat.fao.org/beta/es/#data/QC/visualize>>. Acceso en: 4 de Noviembre, 2016.
- Fernández-Sosa, R.; Carballo-Carballo, A.; Villaseñor-Mir, H.E.; Hernández-Livera, .A. 2015. Calidad de la semilla de trigo de temporal en función del ambiente de producción. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6:1239-1251.
- Filho, J.M. 2015. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. *Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.)* 72:363-374. DOI:10.1590/0103-9016-2015-0007.
- Grabe, D.F. 1976. Measurement of seed vigor. *Journal of Seed Technology* 1:18-31.
- ISTA, International Seed Testing Association. International. Handbook of vigour test methods. Zurich. Switzerland. 1981.
- ISTA, International Seed Testing Association. International rules for seed testing. Zurich. Switzerland. 2005.
- ISTA, International Seed Testing Association. International rules for seed testing. Zurich. Switzerland. 2004.
- Jyoti; Malik, C.P. Seed deterioration: A review. 2013. *International Journal of life Sciences Biotechnology and Pharma Research* 2:374-385.
- Líra-Saldívar, R.H. 2007. *Fisiología Vegetal*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Editorial Trillas, 2ed, pp 141.
- Milošević, M.; Vujaković, M.; Karagić, D. 2015. Vigour test as indicators of seed viability. *Genetika* 42:103-118. DOI: 10.2298/GENSR1001103M.

Moterle, L.M.; BraccinI, A.L.; Scapim, C.A.; Pinto, R.J.B.; Gonçalves, L.S.; Amaral Junior, A.T.; Silva, T.R.C. 2011. Combining ability of tropical maize lines for seed quality and agronomic traits. *Genetics and Molecular Research* 10:2268-2278. DOI: 10.4238/vol10-3gmr1129.

OASA, Association of Official Seed Analysts. Seed vigour testing handbook. East Lasing. 1983.

Pacheco, A.; Vargas, M.; Alvarado, G.; Rodríguez, F.; Crossa, J.; Burgueño, J. 2015. International Maize and Wheat Improvement Center. "GEA-R (Genotype x Environment Analysis with R for Windows) Version 2.0". Disponible en: <<http://hdl.handle.net/11529/10203>>. Acceso en: 2 de Enero, 2015.

Pérez-Mendoza, C.; Hernández-Livera, A.; González-Cossio, F.V.; García de los Santos, G.; Carballo-Carballo, A.; Vásquez-Rojas, T.R. y Tovar-Gómez, MA. 2006. Tamaño de semilla y relación con su calidad fisiológica en variedades de maíz para forraje. *Agricultura técnica de México* 32:341-352.

SAS, 2000. Statistical Analysis System. Software Release V 8.1. SAS Institute Inc. Cary, N.C., USA.

Shah, F.S.; Watson, CE.; Cabrera, E.R. 2002. Seed vigor testing of sub-tropical corn hybrids. Mississippi Agricultural & Forestry Experiment Station. Research Report 23:1-6.

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2013. Estadística de la producción 2013. Disponible en

:<<http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/siap/Paginas/estadistica.aspx>>  
. [Acceso en: 4 de Noviembre, 2016].

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2016. Estadística de la producción 2016. Disponible en :<<http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/siap/Paginas/estadistica.aspx>>  
. [Acceso en: 4 de Noviembre, 2016].

SNICS, Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. 2013. Reglas para la calificación de semillas de maíz. Disponible en: <<http://www.gob.mx/snics/acciones-y-programas/certificacion-de-semillas>>. Acceso en: 4 de Noviembre, 2016.

Sulewska, H.; Śmiatacz, K.; Szymańska, G.; Panasiewicz, K.; Bandurska H.; Głowicka-Wołoszyn, R. 2014. Seed size effect on yield quantity and quality of maize (*Zea mays* L.) cultivated in South East Baltic region. *Zemdirbyste-Agriculture* 101:35–40. DOI 10.13080/z-a.2014.101.005.

Vázquez-Carrillo, M.G.; Mejía-Andrade, H.; Tut-Couoch, C.; Gómez-Montiel, N. 2012. Características de granos y tortillas de maíces de alta calidad proteínica desarrollados para los Valles Altos Centrales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:23-31.

Vázquez-Carrillo, M.G.; Santiago-Ramos, D.; Salinas-Moreno, M.Y.; Rojas-Martínez, I.; Arellano-Vázquez, J.L.; Velázquez-Cardelas, G.A.; Espinosa-Calderón, A. 2012a. Interacción Genotipo-Ambiente del rendimiento y calidad del grano y tortilla de híbridos de maíz en Valles Altos de Tlaxcala, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:229-237.

- Virgen-Vargas, J.; Zepeda-Bautista, R.; Ávila-Perches M.A.; Espinosa-Calderón, A.; Arellano-Vázquez, J.L.; Gámez-Vázquez, A.J. 2014. Producción de semillas de líneas progenitoras de maíz: densidad de población e interacción. *Agronomía Mesoamericana* 25:323-335.
- Virgen-Vargas, J.; Zepeda-Bautista, R.; Ávila-Perches, M.A.; Espinosa-Calderón, A.; Arellano-Vázquez, J.L.; Gámez-Vázquez, A.J. 2016. Producción y calidad de semilla de maíz en Valles Altos de México. *Agronomía Mesoamericana* 27:191-206.
- Yan, W.; Kang, M.S. 2003. *GGE Biplot Analysis. A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists.* CRC Press Boca Raton, Florida, USA. p.271.



## **CAPÍTULO III**

### **CALIDAD FÍSICA Y FISIOLÓGICA DE SEMILLA DE MAÍZ Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES**

#### **3.1 RESUMEN**

El conocimiento sobre la correlación entre los rasgos agronómicos y de calidad en la expresión del rendimiento como criterios de selección indirecta es importante para la selección de genotipos. El objetivo fue determinar la correlación de los caracteres agronómicos y de calidad física y fisiológica, e identificar los que están más asociados al rendimiento. Durante 2014 y 2015, se evaluaron 15 genotipos tres híbridos trilineales, sus líneas endogámicas y sus cruzas simples progenitoras, en tres localidades: 1) Coatlinchán, (COA), Estado de México, 2) San Luis de la Paz (SLP) y 3) Celaya (CEL), Guanajuato, se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se midieron variables, a) agronómicas: floración masculina, floración femenina, altura de la planta, altura de mazorca; b) de rendimiento y sus componentes: longitud y diámetro de mazorca, número de hileras por mazorca y número de granos por hileras, c) calidad física: peso de mil semillas, peso hectolítrico, porcentaje de semilla comercial; y d) fisiológica: porcentaje de germinación y peso seco de plántula, en germinación estándar, prueba de frío y envejecimiento acelerado. Con el propósito de detectar la asociación del rendimiento con caracteres agronómicos y de calidad de semilla, se efectuaron tres metodologías: a) se hizo un análisis para determinar los coeficientes de correlación Pearson, b) se realizó un análisis de componentes principales y c) un análisis de correlación canónica entre dos grupos de variables, agronómicas y de calidad. Las variables de mayor correlación con el rendimiento

fueron el peso seco de plántula en la prueba de germinación estándar ( $r=0.92$ ) y prueba de frío ( $r=0.90$ ), porcentaje de germinación en la prueba de germinación estándar ( $r=0.89$ ) y frío ( $r=0.85$ ), diámetro de mazorca ( $r=0.86$ ) y peso de mil semilla ( $r=0.86$ ) en la correlación de Pearson. En el análisis de componentes principales sobresalieron la longitud de mazorca (0.2736) y número de granos por hilera (0.2708), correlacionándose con las variables peso seco de plántula en la prueba de germinación estándar (0.2738) y prueba de frío (0.2710). El análisis de correlaciones canónicas mostró que existe una alta correlación (0.9275) en las variables agronómicas y de calidad. Los análisis multivariados otorgaron la mayor ponderación a las variables de peso seco de plántula de germinación estándar y peso seco de plántula y germinación en la prueba de frío. Los componentes agronómicos del rendimiento que destacaron fueron la longitud de mazorca y el número de granos por hilera.

**Palabras clave:** características agronómicas y de calidad, correlación canónica, componentes principales

# **PHYSICAL AND PHYSIOLOGICAL QUALITY OF MAIZE SEEDS AND THEIR RELATION WITH YIELD AND ITS COMPONENTS**

## **3.2 ABSTRACT**

Knowledge of the correlation between the agronomical and quality characteristics in the expression of yield as indirect selection criteria is important for the selection of genotypes. The objective was to determine the correlation between the agronomical characteristics and those of physical and physiological quality, and identify which are most associated with yield. During 2014 and 2015, 15 genotypes, three tri-lineal hybrids, their endogamous lines, and their simple cross parents were evaluated in three locations: 1) Coatlinchan (COA), in the State of Mexico, 2) San Luis de la Paz (SLP), and 3) Celaya (CEL), Guanajuato. A completely randomized block design with three replicates was used. The following variables were measured: a) agronomical: male flowering, female flowering, plant height, ear height; b) yield and its components: ear length and diameter, number of rows per ear, and number of grains per ear; c) physical quality: weight of a thousand seeds, hectoliter weight, and percentage of commercial seeds; and d) physiological: percentage of germination and dry weight of seedlings in standard germination, cold test, and accelerated ageing. In order to detect the association of yield with agronomical seed quality characteristics, three methodologies were used: a) an analysis was done to determine the Pearson correlation coefficients, b) an analysis of main components was done, and c) a canonical correlation analysis between two groups of variables was carried out, agronomical and quality. The multivariate analyses gave the highest pondering to the dry weight of standard germination seedling and dry weight of seedling and germination in the cold test variables. The variables with the highest correlation with yield were seedling dry

weight in the standard germination test (0.92) and cold test (0.90), germination percentage in the standard germination test (0.89) and cold (0.85), diameter of cob (0.86) and weight of a thousand seeds (0.86) in the Pearson correlation. In the analysis of main components, the length of ear (0.2736) and number of grains per row (0.2708) stood out, correlating with the variables seedling dry weight in the standard germination test (0.2738) and cold test (0.2710). The analysis of canonical correlations showed that there is a high correlation (0.9275) in the agronomic and quality variables. The agronomical components of yield that stood out were ear length and number of grains per row. These results determine the correlation between the agronomical characteristics and those of physical and physiological quality associated with yield.

**Key words:** agronomic and quality characteristics, canonical correlation, main components

### 3.3 INTRODUCCIÓN

El abastecimiento en la producción y uso de semillas mejoradas de maíz (*Zea mays* L.) es estratégico e influye en el incremento de la producción (Espinosa-Calderón *et al.*, 2014). En México anualmente solo se producen 62.5 mil toneladas de semilla de maíz en promedio, cantidad necesaria para sembrar el 42.2 % de la superficie, con un déficit superior a 90 mil t, las áreas con mayor déficit son el centro (31, 650 t) y sur del país (34, 375 t) de acuerdo a la demanda de consumo (García-Salazar y Ramírez-Jaspeado, 2014). En los Valles Altos Centrales de México (Hidalgo, Tlaxcala, México, Puebla, Querétaro, Michoacán, Morelos) se siembra el 9 % del volumen total de semilla de maíz (SNICS, 2014), lo que permite sembrar tan solo el 6 % de la superficie con maíz, cuyo rendimiento es de 2.8 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2014).

El rendimiento de grano es un rasgo importante por que mide la productividad económica del maíz (Yagdi, 2009); y se puede definir como la cantidad máxima de materia seca de semilla que puede ser acumulada por un cultivo en condiciones ideales; sin embargo, en maíz es difícil medir con precisión el potencial máximo de rendimiento, porque casi todos los ambientes tienen cierto nivel de estrés biótico o abiótico (Cicchino *et al.*, 2010) que afecta el crecimiento óptimo de la planta (Leibman *et al.*, 2014), influyendo en sus características, ya que el rendimiento es un rasgo cuantitativo poligénico complejo, de baja heredabilidad, resultante de la expresión y asociación de diferentes componentes, afectados por los demás caracteres de la planta (Vilela-De Souza *et al.*, 2014), la selección de materiales sobresalientes con base solamente en el rendimiento no es muy eficiente. La calidad de las semillas es un factor importante que determina el desarrollo y crecimiento de los cultivos, por lo que se debe considerar en los estudios para elevar el rendimiento y

facilitar la producción de plántulas normales (Sulewska, 2014). La selección de genotipos con alto rendimiento, considerando rasgos morfológicos y fisiológicos como criterios de selección indirecta son un enfoque de reproducción alternativo para la selección de genotipos (Zarei, 2017). A través del tiempo con selección se han cambiado rasgos de genotipos, aumentando la resistencia a diferentes tipos de estrés; así como también hacia cambios morfológicos y fisiológicos que promueven la eficiencia en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los genotipos que se van liberando a través del tiempo producen más que sus predecesores en condiciones de crecimiento favorables y desfavorables; la selección en la capacidad de la planta se ha enfocado en superar altos y bajos niveles de estrés, en lugar de mejorar la productividad primaria; enfoque que ha sido la principal fuerza impulsora de una mayor capacidad de producción (Duvick, 2005).

Dada la importancia del maíz en la producción de alimentos, fibras, combustible, etc., la mejora continua del rendimiento y la calidad es un reto importante, por lo que se requiere identificar caracteres que contribuyen al rendimiento y calidad de semilla, para aumentar la eficiencia en la producción.

Muhammad *et al.* (2010) realizaron estudios para determinar parámetros de variabilidad genética y la relación del efecto en el rendimiento de maíz en 30 progenies desarrolladas de líneas cruzadas con tres probadores, obteniendo una correlación positiva del rendimiento con el peso de 100 semillas, número de hileras por mazorca y número de granos por hilera; Pérez de la Cerda *et al.* (2007) encontró una mayor correlación con el peso de 100 semillas al evaluar poblaciones de maíz. Pérez-Mendoza *et al.* (2006) menciona que en calidad fisiológica los pesos secos de plántula, raíz tuvieron y el peso seco de la parte aérea tuvieron relevancia; sin embargo los parámetros que explicaron el

comportamiento en campo fueron el peso de 1000 semillas, longitud de semilla, velocidad de emergencia y peso seco de la parte aérea.

Se han utilizado diferentes procedimientos estadísticos de análisis multivariados para resumir grandes cantidades de datos por medio de pocos parámetros con el interés de encontrar relaciones entre a) variables respuesta, b) unidades experimentales y c) en variables respuesta como en unidades experimentales; algunos métodos clasificados como técnicas dirigidas por las variables son los que se enfocan en las relaciones que podrían existir entre las variables que se están midiendo, entre estas técnicas se encuentran en los análisis realizados sobre las matrices de correlación, incluyendo, análisis de componentes principales, análisis de correlación canónica, análisis por factores y análisis de regresión (Dallas, 1998). Estas técnicas tienen el potencial de aumentar la comprensión de las variables por los fitomejoradores; así como determinar la naturaleza y la secuencia de los rasgos que se seleccionarán en los programas de mejoramiento y para determinar las características del rendimiento de grano en diferentes híbridos de maíz cultivados bajo altas temperaturas y déficit hídrico (Ali *et al.*, 2015), bajo diferentes niveles de fertilización (El-Badawy, 2011) demostrando eficiencia al identificar los efectos de las variables predictoras. Estas técnicas se han utilizado para explicar la relación entre rendimiento y su asociación con diferentes factores (Zarei *et al.*, 2013). La técnica de análisis de componentes principales se ha utilizado para discriminar entre variables de calidad fisiológica utilizadas para determinar el vigor en semillas de maíz (Hernández *et al.*, 2000) y el análisis de correlación canónica ha sido utilizada para relacionar grupos de variables de vigor y componentes de rendimiento en poblaciones de maíz (Pérez de la Cerda *et al.*, 2007). Las correlaciones se han utilizado en variables de vigor para correlacionar caracteres agronómicos y de rendimiento (Cervantes-Ortiz *et al.*, 2014). Para una selección efectiva, la

información sobre el conocimiento de la correlación entre los rasgos agronómicos y de calidad, sus contribuciones a la producción y el grado de influencia en la expresión del rendimiento son importantes. De acuerdo a lo antes mencionado, el objetivo fue determinar la correlación de los caracteres agronómicos y de calidad física y fisiológica, e identificar los que están más asociados al rendimiento.

### **3.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

Se evaluaron 15 genotipos, tres híbridos trilineales, sus líneas endogámicas y sus cruza simples progenitoras (Cuadro 1.1, Capítulo I); en tres localidades: 1) Coatlinchán, (COA), Estado de México, 2) San Luis de la Paz (SLP) y 3) Celaya (CEL), Guanajuato (Cuadro 1.2 Capítulo I). El tipo de suelo fue franco arenoso para las localidades de COA y SLP; y franco arcilloso para CEL. La siembra se realizó en el ciclo primavera-verano en el 2014 y 2015, en el último año no se estableció el ensayo en Celaya; por lo que se evaluaron cinco ambientes (COA 2014 (8 de mayo) y 2015 (7 de mayo), SLP 2014 (21 de mayo) y 2015 (22 de junio) y CEL 2014 (15 de mayo), la densidad de población fue de 65,000 plantas por ha y se aplicó la dosis de fertilización: 150-70-00 de NPK, los ensayos se condujeron bajo condiciones de riego se aplicó un riego de germinación y dos de auxilio. El control de malezas se realizó con escarda mecánica y la aplicación de una mezcla de herbicida preemergente y una de herbicida postemergente. Para el control del gusano cogollero se realizó una aplicación de Spinetoram (100 mL ha<sup>-1</sup>) y una de Clorpirifos etil (1 L ha<sup>-1</sup>).



Los ensayos de campo se establecieron con un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, la parcela experimental fue de 4 surcos de 5 m de largo y 0.80 m entre surcos, donde se consideró como parcela útil los dos surcos centrales. La evaluación de variables agronómicas, y de calidad física de semilla se realizaron en las instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias del Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX-INIFAP) ubicado en Texcoco, Estado de México y en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ-INIFAP), ubicado en Celaya, Guanajuato. Las variables se registraron de la siguiente manera:

### **Variables agronómicas**

Para cada parcela experimental se registraron los datos de: 1) floración masculina (FM), contabilizando los días desde el momento en que se realiza el primer riego hasta que el 50 % de las espigas estuvieran derramando polen, 2) la evaluación de la floración femenina (FF) se realizó contabilizando los días desde el momento en que se realiza el primer riego hasta que el 50 % de las plantas presentarán estigmas con una longitud de un centímetro, 3) Para la altura de la planta (AP) se seleccionaron 5 plantas al azar, y se midió la longitud (cm) desde la base del tallo hasta la base de la espiga, en las mismas plantas se midió 4) la altura de mazorca (AM) se determinó desde la base de la planta hasta el nudo con la mazorca superior. 5) El rendimiento (REN), se estimó en  $t\ ha^{-1}$ , ajustándolo al 14 % de humedad de la semilla, se calculó con la fórmula:  $REN = [PC \times \% MS \times \% G \times FC] / 8600$ ; donde PC = peso de campo de mazorca; % MS = porcentaje de materia seca (100 - % humedad de semilla); % G = porcentaje de semilla, como promedio de la relación entre el peso de semilla y el peso de mazorca sin brácteas, de cinco mazorcas, multiplicado por 100; FC = factor de corrección ( $10\ 000\ m^2$  / la superficie útil de la parcela); 8600 = valor

constante, que permite estimar el rendimiento con una humedad del 14 %. De cada parcela experimental se obtuvieron 5 mazorcas representativas a las cuales se les midió 6) la longitud (LM) y 7) el diámetro de mazorca (DM) en su parte media, con la ayuda de una regla y un vernier, respectivamente; 8) se cuantificó el número de hileras por mazorca (NHM) tomando como referencia la parte media de la misma; 9) el número de granos por hileras (NGH) se contabilizó en tres hileras desde la base hasta la punta de la mazorca.

### **Variables de calidad física**

Con el grano proveniente de la cosecha de cada parcela útil se determinaron las características de calidad física. 1) Peso de mil semillas (PMS), se contaron y pesaron ocho repeticiones de 100 semillas por parcela experimental; se calculó la varianza, desviación estándar y coeficiente de variación (C.V.); si el valor del C.V. era menor del 4% se consideraba el dato y se obtenía el PMS multiplicando la media aritmética de las repeticiones por 10 (ISTA, 2005), se expresó en gramos. 2) El peso hectolítrico (PH) se determinó el peso de un litro de semilla en una báscula marca OHAUS® y se transformó a  $\text{kg hL}^{-1}$ . 3) El porcentaje de semilla comercial (%SC) se obtuvo al clasificar un kilo de semilla por parcela experimental con cribas de perforación redonda de 8, 7 y 6 mm de diámetro, se consideró como semilla comercial a la suma de semilla retenida por las cribas 8 y 7.

### **Variables de calidad fisiológica**

La evaluación de las variables de calidad fisiológica se realizó en el laboratorio de análisis de semillas del posgrado de Recursos Genéticos y Productividad del Colegio de Posgraduados, Campus Montecillos, y en las instalaciones del Campo Experimental Valle

de México del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CEVAMEX-INIFAP), ubicados en Texcoco, Estado de México. Se utilizó semilla proveniente del control manual de la polinización para el incremento de las líneas y formación de cruzas simples e híbridos; para el incremento de semilla se utilizó el método de polinización controlada, para lo cual en las plantas de los surcos orilleros de cada parcela experimental se cubrieron los jilotes antes de la emergencia de los estigmas y posteriormente se colectaba el polen de las espigas correspondientes. Para la producción de semilla de las líneas endogámicas se realizaron cruzas fraternales entre plantas de la misma línea y para la formación de cruzas simples o híbridos trilineales se polinizaron los estigmas del progenitor hembra con el progenitor macho correspondientes. Se utilizaron las pruebas de germinación estándar, prueba fría y envejecimiento acelerado.

1) Prueba de germinación estándar (PGE) se realizó de acuerdo a las recomendaciones de la ISTA (2005) utilizando el método entre papel, que consiste en extender dos toallas sanitas humedecidas con agua destilada sobre una superficie plana, en las cuales se colocaron 25 semillas, se orientaron los embriones hacia la parte inferior, distribuidas en cinco columnas y cinco hileras; se cubrieron las semillas con dos toallas húmedas, y se enrollaron en forma de “taco”. Se utilizó un diseño completamente al azar, con 4 repeticiones y la unidad experimental fue una planta.

Se utilizó el mismo número de repeticiones, unidad experimental y metodología para la siembra y evaluación de las variables de germinación y peso seco de plántula en las tres pruebas.

2) Prueba de frío (PF), después de la siembra la semilla de los genotipos se sometieron a estrés colocando los rollos (“tacos”) que contenían la semilla en un ambiente

controlado por 7 días a 10 °C (Burris y Navratil, 1979) en ausencia de luz, transcurrido este tiempo, se colocaron en la cámara de germinación, a una temperatura de 25 °C. Siete días después se realizó la evaluación de la germinación y peso seco de plántula.

3) Prueba de envejecimiento acelerado (PEA), antes de la siembra, la semilla de los genotipos se sometió a una temperatura de 40 °C y 100 % de humedad relativa por 96 horas. Se utilizaron contenedores plásticos de 11 x 11 x 3.5 cm con 150 ml de agua destilada y una malla metálica de 0.5 x 0.5 cm, colocada en la parte media de la caja, sobre la que se colocaron las semillas, las cajas se sellaron herméticamente. Después del estrés de envejecimiento se realizó la prueba de germinación utilizando el método de la prueba de germinación estándar.

Variables evaluadas en las pruebas de calidad fisiológica:

a) La germinación, se determinaron las plántulas normales con base en aquellas que tenían raíz, coleóptilo y hojas bien desarrolladas, sanas y sin malformaciones; y se expresó en porcentaje.

b) El peso seco de plántula se determinó a partir de plántulas normales, separando la parte aérea a partir del nudo del coleóptilo y se colocaron en pequeños sobres de papel de 8 x 19.5 cm y se sometieron a una temperatura de 70 °C durante 72 horas, transcurrido este tiempo se pesaron y se dividieron entre el número de plántulas normales para obtener el peso seco y se expresó en mg por plántula.

Con el propósito de detectar la asociación del rendimiento con caracteres agronómicos y de calidad de semilla, se efectuaron tres metodologías: a) se hizo un análisis para determinar los coeficientes de correlación Pearson, entre rendimiento y cada una de las variables agronómicas y de calidad; b) se realizó un análisis de componentes principales

para generar nuevas variantes no correlacionadas, para determinar la dimensionalidad real del espacio en el que caen los datos; es decir, el número de componentes principales que tienen varianzas mayores que cero, se utilizó la gráfica SCREE de los valores propios, la cual se construye al situar el valor de cada valor propio contra el recíproco; cuando los puntos de la gráfica tienden a nivelarse, estos valores propios suelen estar suficientemente cercanos a cero como para que puedan ignorarse. Por lo que los más pequeños están midiendo solo ruido aleatorio; y la dimensionalidad del espacio de datos es la que corresponde al valor propio grande más pequeño (Dallas, 1998); c) además de un análisis de correlación canónica entre dos grupos de variables, agronómicas y de calidad. Para todos los análisis se utilizó el programa SAS (2000).

Cuando se requiere analizar un gran número de variables los análisis de componentes principales y análisis de correlaciones canónicas son métodos útiles para estudiar las relaciones (Dallas, 1998; León-González *et al.*, 2008) y reducción de variables en las ciencias de las plantas (Kumar *et al.*, 2017).

### **3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Se calcularon las estadísticas básicas de las variables agronómicas, de calidad física y fisiológica (Cuadro 3.1) donde se observó que el valor máximo del coeficiente de variación lo presentó la variable de rendimiento (REN), presentando mayor heterogeneidad de los valores en los datos y el valor mínimo la variable de floración femenina (FF) y peso hectolítrico (PH).

**Cuadro 3.1 Estadísticas básicas para el análisis de las variables agronómicas, de rendimiento, calidad física y fisiológica para estimar el rendimiento en progenitores e híbridos de maíz. 2014-2015.**

<b>Variable</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Desviación estándar (<math>\sigma</math>)</b>	<b>Varianza (<math>\sigma^2</math>)</b>	<b><math>\bar{x}</math></b>
<b>FM</b>	72.4	83.7	3.9	15.6	76.9
<b>FF</b>	75.4	87.9	4.4	19.5	79.6
<b>AP</b>	1.2	2.3	0.4	0.1	1.9
<b>AM</b>	0.6	1.4	0.3	0.1	1.1
<b>REN</b>	0.9	7.6	2.3	5.1	3.9
<b>LM</b>	8.0	13.9	2.1	4.4	11.6
<b>DM</b>	3.6	4.9	0.4	0.2	4.3
<b>NHM</b>	13.8	17.6	1.2	1.4	16.2
<b>NGH</b>	14.3	29.5	5.0	24.9	23.3
<b>PMS</b>	214.1	321.2	36.9	1365.2	273.2
<b>PH</b>	64.0	76.5	3.6	13.0	71.9
<b>%SC</b>	20.3	86.5	20.3	412.3	67.8
<b>%GPGE</b>	76.0	94.6	5.5	29.9	87.9
<b>PSPGE</b>	22.8	56.3	8.8	77.7	38.2
<b>%GPF</b>	56.6	84.5	8.1	65.8	74.1
<b>PSPF</b>	16.4	37.9	6.0	35.6	27.5
<b>%GPEA</b>	44.4	85.1	11.9	141.3	66.5
<b>%PSEA</b>	27.0	53.3	7.5	55.6	39.8

FM: floración masculina, FF: floración femenina, AP: altura de planta, AM: altura de mazorca, REN: rendimiento, LM: longitud de mazorca, DM: diámetro de mazorca, NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número de granos por hilera, PMS: peso de mil semillas, PH: peso hectolítrico, %SC: porcentaje de semilla comercial, %GPGE: porcentaje de germinación con la prueba de germinación estándar, PSPGE: peso seco de plántula en la prueba de germinación estándar, %GPF: porcentaje de germinación en la prueba de frío, PSPF: peso seco de plántulas en la prueba de frío, %GPEA: porcentaje de germinación en la prueba de envejecimiento acelerado, PSPEA: peso seco de plántula en la prueba de envejecimiento acelerado,  $\bar{x}$ : media aritmética.

### **3.5.1 Relación entre rendimiento y características agronómicas, de calidad física y fisiológica.**

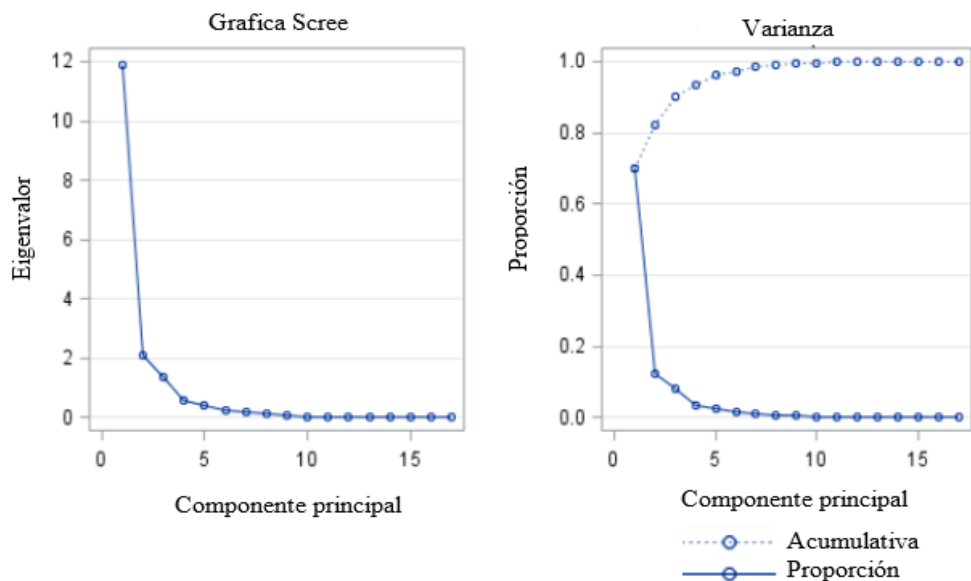
#### **Análisis de correlación de Pearson**

Para que un rasgo sea considerado como criterio de selección debe estar relacionado con el rendimiento; por lo que es esencial determinar la correlación de las características con el rendimiento (Zarei *et al.*, 2013). Se observó que todos los rasgos incluidos en el estudio mostraron una correlación positiva significativa con el rendimiento de semilla a excepción del porcentaje de semilla comercial (%SC) (Cuadro 3.2); resultados similares fueron encontrados por Milander 2015 al correlacionar el rendimiento con variables agronómicas, de calidad física y componentes del rendimiento, encontrando correlación con todas las variables a excepción del número de mazorcas por m<sup>2</sup>. Las variables que mostraron una mayor correlación con el rendimiento (REN) fueron el diámetro de mazorca (DM)  $r=0.86$ , peso de mil semilla (PMS)  $r=0.86$ , el peso seco de plántula en la prueba de germinación estándar (PSPGE)  $r=0.92$ , porcentaje de germinación en la prueba de frío (%GPF)  $r=0.85$ , peso seco de plántulas en la prueba de frío (PSPF)  $r=0.90$  y el porcentaje de germinación en la prueba de envejecimiento acelerado (%GPEA)  $r=0.89$ . Resultados similares de PMS ( $r=0.86$ ) fueron encontrados por Selvaraj y Nagarajan (2011) al evaluar líneas progenitoras e híbridos de maíz. El número de hileras por mazorca (NHM) mostró una correlación altamente significativa pero con el valor más bajo ( $r=0.66$ ) a diferencia del resto de las variables. Milander (2015) menciona que el número de granos tiene efecto directo mayor con el REN. Sin embargo, Vilela-De Souza *et al.* (2014) mencionan que el estudio de correlaciones, es sólo una medida de asociación que no permite obtener

conclusiones sobre las relaciones de causa y efecto, y que es importante realizar más análisis que identifiquen caracteres que contribuyan a la productividad de semilla de maíz.

### **Análisis de componentes principales**

Para determinar el número de componentes a retener se utilizó el gráfico de sedimentación SCREE (sedimentación) de los valores propios y los porcentajes acumulados de varianza; criterios más utilizados para determinar el número de componentes principales. En la gráfica SCREE (Figura 3.1) se observa una ruptura entre el segundo y tercer componente, en este punto el descenso se estabiliza, por lo que se consideraron los dos primeros componentes que explican el mayor porcentaje de la variabilidad total medida de las variables; investigadores sugieren que para variables de laboratorio con dos o tres componentes se puede explicar el 95 % de la variabilidad total a diferencia de otras variables donde puede ser entre del 70 al 75% (León-González *et al.*, 2008).



**Figura 3.1 Gráfica de sedimentación de variabilidad total de los valores propios (eigenvvalor) y de varianza explicada por componente. 2014-2015.**



**Cuadro 3.2 Matriz de coeficientes de correlación simple (r) de las variables agronómicas de calidad física y fisiológica de progenitores e híbridos de maíz. 2014-2015.**

Variables	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18
FM (X1)	1.00																	
FF (X2)	0.99**	1.00																
AP (X3)	-0.58*	-0.48 <sup>ns</sup>	1.00															
AM (X4)	-0.47 <sup>ns</sup>	-0.36 <sup>ns</sup>	0.98**	1.00														
REN (X5)	<b>-0.78**</b>	<b>-0.71**</b>	<b>0.82**</b>	<b>0.72**</b>	<b>1.00</b>													
LM (X6)	-0.78**	-0.70**	0.91**	0.85**	<b>0.84**</b>	1.00												
DM (X7)	-0.47 <sup>ns</sup>	-0.37 <sup>ns</sup>	0.91**	0.89**	<b>0.86**</b>	0.80**	1.00											
NHM (X8)	-0.74**	-0.69**	0.68**	0.57*	<b>0.66**</b>	0.85**	0.56*	1.00										
NGH (X9)	-0.73**	-0.66**	0.89**	0.82**	<b>0.82**</b>	0.98**	0.80**	0.90**	1.00									
PMS (X10)	-0.55*	-0.47 <sup>ns</sup>	0.69**	0.65**	<b>0.86**</b>	0.61*	0.81**	0.29 <sup>ns</sup>	0.54*	1.00								
PH (X11)	-0.89**	-0.88**	0.59*	0.44 <sup>ns</sup>	<b>0.80**</b>	0.79**	0.49 <sup>ns</sup>	0.77**	0.77**	0.57*	1.00							
%SC (X12)	-0.02 <sup>ns</sup>	0.02 <sup>ns</sup>	0.19 <sup>ns</sup>	0.19 <sup>ns</sup>	<b>0.41<sup>ns</sup></b>	0.04 <sup>ns</sup>	0.42 <sup>ns</sup>	-0.32 <sup>ns</sup>	-0.04 <sup>ns</sup>	0.76**	0.06 <sup>ns</sup>	1.00						
%GPGE (X13)	-0.73**	-0.68**	0.77**	0.73**	<b>0.83**</b>	0.78**	0.76**	0.68**	0.79**	0.63**	0.67**	0.14 <sup>ns</sup>	1.00					
PSPGE (X14)	-0.77**	-0.70**	0.77**	0.66**	<b>0.92**</b>	0.84**	0.81**	0.80**	0.85**	0.75**	0.83**	0.26 <sup>ns</sup>	0.76**	1.00				
%GPF (X15)	-0.73**	-0.69**	0.65**	0.56*	<b>0.85**</b>	0.73**	0.71**	0.69**	0.75**	0.72**	0.82**	0.27 <sup>ns</sup>	0.87**	0.85**	1.00			
PSPF (X16)	-0.83**	-0.79**	0.70**	0.57*	<b>0.90**</b>	0.84**	0.73**	0.79**	0.86**	0.68**	0.89**	0.20 <sup>ns</sup>	0.74**	0.94**	0.85**	1.00		
%GPEA (X17)	-0.57*	-0.52*	0.75**	0.65**	<b>0.89**</b>	0.69**	0.78**	0.50 <sup>ns</sup>	0.68**	0.79**	0.69**	0.48 <sup>ns</sup>	0.72**	0.80**	0.80**	0.77**	1.00	
PSPEA (X18)	-0.70**	-0.64*	0.76**	0.66**	<b>0.81**</b>	0.78**	0.74**	0.67**	0.78**	0.64**	0.69**	0.14 <sup>ns</sup>	0.57*	0.80**	0.59*	0.82**	0.61*	1.00

\*, \*\*, <sup>ns</sup>: p<0.05, p<0.01 y p>0.05, respectivamente. FM: floración masculina, FF: floración femenina, AP: altura de planta, AM: altura de mazorca, REN: rendimiento, LM: longitud de mazorca, DM: diámetro de mazorca, NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número de granos por hilera, PMS: peso de mil semillas, PH: peso hectolitro, %SC: porcentaje de semilla comercial, %GPGE: porcentaje de germinación con la prueba de germinación estándar, PSPGE: peso seco de plántula en la prueba de germinación estándar, %GPF: porcentaje de germinación en la prueba de frío, PSPF: peso seco de plántulas en la prueba de frío, %GPEA: porcentaje de germinación en la prueba de envejecimiento acelerado, PSPEA: peso seco de plántula en la prueba de envejecimiento acelerado.

En el análisis de componentes principales (Cuadro 3.3), se observó que la CP1 explica el 70 % de la variabilidad total de los datos originales y el CP2 el 12 %; por lo que en conjunto explican el 82% de la variabilidad total medida de las variables. Con base en el valor absoluto de los vectores propios se determinó la importancia de las variables dentro de cada componente; el peso seco de plántulas en la prueba de germinación estándar en el componente 1 (PSPGE) y el porcentaje de semilla comercial (%SC) en el componente 2, fueron las variables con mayor ponderación en cada uno de los componentes (0.2738 y 0.6055), variables no correlacionadas (0.26<sup>ns</sup>). Goggi *et al.* (2008) mencionan que la calidad de la semilla es un factor importante que determina el desarrollo y crecimiento de un cultivo, por lo que se debe considerar para mejorar el rendimiento, ya que tiene una relación alta con la emergencia en campo.

Las variables agronómicas LM (0.2736) y NGH (0.2708), están altamente correlacionadas con las variables PSPGE (0.2738) y PSPF (0.271) de calidad fisiológica sobresaliendo en el CP1 con los mayores valores característicos positivos; mientras que en el CP2 las variables de calidad física %SC (0.605) y PMS (0.391) están altamente correlacionadas sobresaliendo con el mayor valor característico positivo.

En la Figura 3.2, se presenta el biplot para el CP1 y CP2, en el cuadrante I las variables agronómicas AM y AP, presentan una asociación directa. Resultados similares han sido reportados por Rahman *et al.* (1995), Premlatha y Kalamani (2010) y Wannows *et al.* (2010); sin embargo, también ha sido reportado con una asociación negativa con el rendimiento. Las variables de calidad fisiológica %GPF y PSPGE aparecen muy cerca una de la otra, formando un grupo, con las variables del cuadrante IV, %GPGE, PSPEA, PSPF y los componentes de rendimiento LM y NGH presentando influencias positivas grandes en

el CP1, lo que indica que entre ellas existe una fuerte asociación lineal directa. Kashiani *et al.* (2010) reportan resultados de la correlación de LM con REN. Milaner (2017) reporta que el NGH presenta una relación (secundaria) con el PMS; y este a su vez una relación (primaria) con el REN. En el cuadrante II se observa una relación de las variables agronómicas FF y FM; en el resto de las variables no se observa una relación lineal significativa.

En la Figura 3.2, se presenta el biplot para el CP1 y CP2, en el cuadrante I las variables agronómicas AM y AP, presentan una asociación directa. Resultados similares han sido reportados por Rahman *et al.* (1995), Premlatha y Kalamani (2010) y Wannows *et al.* (2010); sin embargo, también ha sido reportado con una asociación negativa con el rendimiento. Las variables de calidad fisiológica %GPF y PSPGE aparecen muy cerca una de la otra, formando un grupo, con las variables del cuadrante IV, %GPGE, PSPEA, PSPF y los componentes de rendimiento LM y NGH presentando influencias positivas grandes en el CP1, lo que indica que entre ellas existe una fuerte asociación lineal directa. Kashiani *et al.* (2010) reportan resultados de la correlación de LM con REN. Milaner (2017) reporta que el NGH presenta una relación (secundaria) con el PMS; y este a su vez una relación (primaria) con el REN. En el cuadrante II se observa una relación de las variables agronómicas FF y FM; en el resto de las variables no se observa una relación lineal significativa.

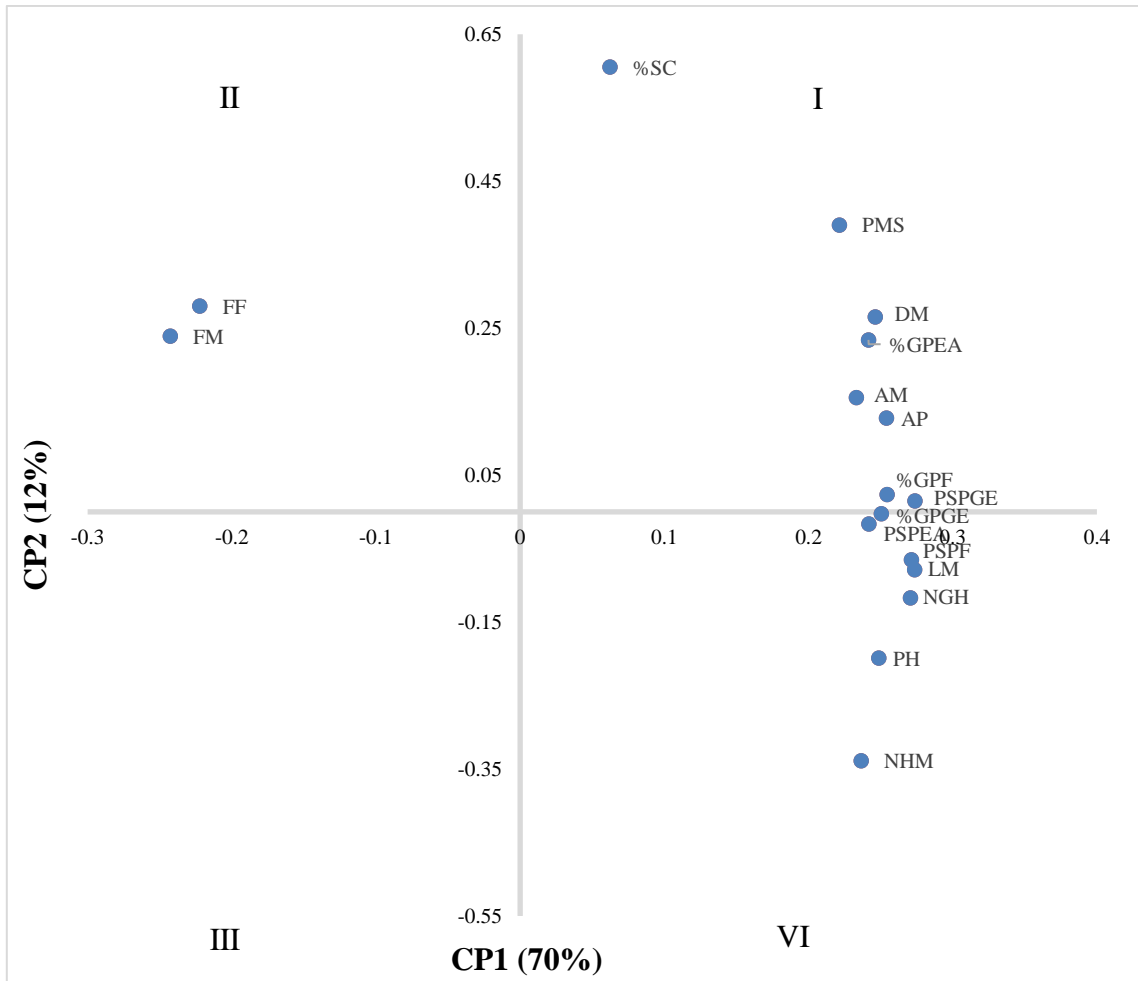
**Cuadro 3.3 Análisis de componentes principales de las variables de calidad física y fisiológica de semilla de maíz. Estado de México y Guanajuato, México 2014-2015.**

Variables	Componentes	
	CP1	CP2
FM	-0.2426	0.2394
FF	-0.2222	0.2802
AP	0.2542	0.1280
AM	0.2332	0.1556
LM	0.2736	-0.0786
DM	0.2463	0.2654
NHM	0.2365	-0.3384
NGH	0.2708	-0.1168
PMS	0.2214	0.3906
PH	0.2488	-0.1986
%SC	0.0623	0.6055
%GPGE	0.2506	-0.0024
PSPGE	0.2738	0.0152
%GPF	0.2545	0.0238
PSPF	0.2714	-0.0652
%GPEA	0.2416	0.2341
PSPEA	0.2420	-0.0162
Valor propio	11.856	2.108
% de varianza acumulada	70	82
Nombre del componente	Peso seco de plántula	%Semilla comercial

FM: floración masculina, FF: floración femenina, AP: altura de planta, AM: altura de mazorca, LM: longitud de mazorca, DM: diámetro de mazorca, NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número de granos por hilera, PMS: peso de mil semillas, PH: peso hectolitrito, %SC: porcentaje de semilla comercial, %GPGE: porcentaje de germinación con la prueba de germinación estándar, PSGE: peso seco de plántula en la prueba de germinación estándar, %GPF: porcentaje de germinación en la prueba de frío, PSPF: peso seco de plántulas en la prueba de frío, %GPEA: porcentaje de germinación en la prueba de germinación estándar, PSPEA: peso seco de plántula en la prueba de envejecimiento acelerado.

En la Figura 3.2, se presenta el biplot para el CP1 y CP2, en el cuadrante I las variables agronómicas AM y AP, presentan una asociación directa. Resultados similares han sido reportados por Rahman *et al.* (1995), Premlatha y Kalamani (2010) y Wannows *et*

*al.* (2010); sin embargo, también ha sido reportado con una asociación negativa con el rendimiento. Las variables de calidad fisiológica %GPF y PSPGE aparecen muy cerca una de la otra, formando un grupo, con las variables del cuadrante IV, %GPGE, PSPEA, PSPF y los componentes de rendimiento LM y NGH presentando influencias positivas grandes en el CP1, lo que indica que entre ellas existe una fuerte asociación lineal directa. Kashiani *et al.* (2010) reportan resultados de la correlación de LM con REN. Milaner (2017) reporta que el NGH presenta una relación (secundaria) con el PMS; y este a su vez una relación (primaria) con el REN. En el cuadrante II se observa una relación de las variables agronómicas FF y FM; en el resto de las variables no se observa una relación lineal significativa.



**Figura 3.2 Análisis de componentes principales de correlación de variables agronómicas, calidad física y fisiológica en semilla de maíz. 2014-2015.**

**Correlaciones canónicas entre caracteres agronómicos y de calidad de semilla.**

Al analizar las variables, agrupadas en variables agronómicas y de calidad se puede observar las primeras correlaciones canónicas  $p_1$  0.92757, la  $p_2$  0.764574 y  $p_3$  0.625276, son estadísticamente significativas (Cuadro 3.4), lo que prueba que los dos grupos de características no son independientes.

**Cuadro 3.4 Correlaciones canónicas de las variables agronómicas y de calidad de progenitores e híbridos trilineales. Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**

	<b>Correlación canónica</b>	<b>Correlación canónica ajustada</b>	<b>Error estándar aproximado</b>	<b>Correlación canónica cuadrada</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Pr &gt; F</b>
1	0.927	0.911	0.016	0.860	72	<.0001
2	0.764	0.707	0.048	0.584	56	<.0001
3	0.625	0.458	0.070	0.390	42	<.0001

En el Cuadro 3.5 se observa las correlaciones entre los caracteres originales y sus correspondientes variables canónicas. Entre las variables agronómicas originales, relacionadas con Agronómicas1 (A1) están rendimiento (REN), longitud de mazorca (LM), número de granos por hilera (NGH) y diámetro de mazorca (DM), y las que se encuentran intensamente correlacionadas en Agronómicas2 (A2) es NHM. Las características medidas por A1 y A2 no están correlacionadas entre sí. De las variables evaluadas de calidad que están intensamente correlacionadas con calidad1 (C1) son peso hectolítrico (PH), peso seco de plántulas en la prueba de frío (PSPF), peso de mil semillas (PMS), peso seco de plántula en la prueba de germinación estándar (PSPGE), porcentaje de germinación en la prueba de frío (%GPF) y porcentaje de germinación con la prueba de germinación estándar (%GPGE). PMS tiene una correlación tanto con C1 como con C2, sin embargo, en este último caso presenta un valor negativo. Nastasić *et al.* (2010) mencionan que existe una correlación altamente significativa del rendimiento con el NGH y la LM.

**Cuadro 3.5 Correlaciones canónicas dentro de los grupos de variables agronómicas y de calidad de semilla de maíz. Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**

<b>Variables Agronómicas</b>	<b>Agronómicas1 (A1)</b>	<b>Agronómicas2 (A2)</b>	<b>Variables de Calidad</b>	<b>Calidad1 (C1)</b>	<b>Calidad2 (C2)</b>
FM	-0.3890	-0.1472	PMS	0.7896	-0.5015
FF	-0.3790	-0.2420	PH	0.8509	0.4074
AP	0.4502	-0.1406	%GPGE	0.5829	0.1075
AM	0.4094	-0.0947	PSPGE	0.7677	0.1329
REN	0.9069	-0.1006	%GPF	0.6258	0.0565
LM	0.7599	0.2437	PSPF	0.7936	0.0605
DM	0.5051	-0.0304	%GPEA	0.5765	-0.2419
NHM	0.4282	0.5150	PSPEA	0.5363	-0.1823
NGH	0.7315	0.3172			

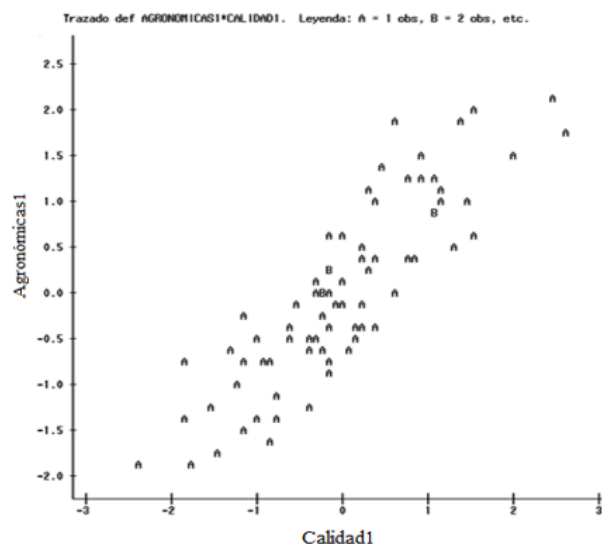
En el Cuadro 3.6 se puede observar que las correlaciones canónicas de mayor importancia entre las variables agronómicas originales y C1 son: REN, LM y NGH; mientras que, en C2 son: NHM y NGH. Por otro lado, entre las variables de calidad original y A1 destacan PH, PSPF y PMS, en tanto que en A2 sobre salen PMS y PH. Es importante mencionar que las correlaciones canónicas de mayor importancia coincidieron, dentro y entre grupos; al respecto Dallas (1998) señala que es posible identificar relación entre grupos contrastantes de variables.



**Cuadro 3.6 Correlaciones canónicas entre los grupos de variables originales agronómicas y de calidad y de variables de calidad con agronómicas de semilla de maíz. Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**

<b>Variables Agronómicas</b>	<b>Calidad1 (C1)</b>	<b>Calidad2 (C2)</b>	<b>Variables de Calidad</b>	<b>Agronómicas1 (A1)</b>	<b>Agronómicas2 (A2)</b>
FM	-0.3608	-0.1126	PMS	0.7325	-0.3835
FF	-0.3516	-0.1851	PH	0.7893	0.3115
AP	0.4176	-0.1075	%GPGE	0.5407	0.0822
AM	0.3797	-0.0724	PSPGE	0.7121	0.1016
REN	0.8412	-0.0769	%GPF	0.5805	0.0432
LM	0.7048	0.1863	PSPF	0.7361	0.0463
DM	0.4685	-0.0233	%GPEA	0.5348	-0.185
NHM	0.3972	0.3937	PSPEA	0.4974	-0.1394
NGH	0.6785	0.2425			

En la Figura 3.3 se observa la dispersión de los valores entre las dos variables canónicas de mayor importancia, obtenidas a partir de los dos grupos de características. La relación lineal entre A1 y C1, es más importante que la existente entre A2 y C2.



**Figura 3.3 Dispersión de valores de la relación lineal entre las correlaciones canónicas agronómicas1 y calidad1. Estado de México y Guanajuato, México. 2014-2015.**

Entre las tres metodologías utilizadas para determinar la asociación de los caracteres evaluados con rendimiento, si bien los coeficientes de correlación de Pearson detectaron valores significativos ( $p < 0.01$ ) entre todas las variables con rendimiento, a excepción del %SC, las de mayor importancia son PSPGE, PSPF y %GPF, las cuales generaron la mayor variabilidad en el análisis de componentes principales y destacaron en el análisis de correlación canónica, así mismo dentro de las variables agronómicas, las de mayor relevancia en estos dos últimos métodos fueron LM y NGH. Los resultados coinciden con los de Cervantes-Ortiz *et al.* (2014) y Pérez de la Cerda *et al.* (2007) que reporta correlación positiva entre el vigor inicial y el rendimiento de grano en genotipos de maíz. Se han reportado que el peso seco de plántula aérea es una variable importante para predecir el establecimiento en campo en condiciones favorables e intermedias (Hernández *et al.*, 2000), lo cual está relacionado con el rendimiento. Por el contrario, Antuna-Grijalva *et al.* (2003) apoyado por un análisis de correlación indica que no existe asociación directa y significativa entre caracteres agronómicos y de calidad de semilla al estudiar los caracteres fenotípicos y efectos genéticos. El rendimiento puede aumentarse mejorando caracteres como la LM, ya que presenta un efecto directo positivo y una correlación significativa con el rendimiento de semilla y el NGH tiene una correlación genética positiva con el rendimiento (Kashiani *et al.*, 2010; Samadzadeh, 2013) en líneas de maíz dulce de progenitores e híbridos de maíz (Selvaraj y Nagarajan, 2011).

No obstante que el %SC, no presentó asociación con rendimiento, es importante mencionar que es un parámetro importante en la producción y rentabilidad de las semillas (Virgen-Vargas *et al.*, 2016).

### 3.6 CONCLUSIONES

Las variables de peso seco de plántula de germinación estándar, germinación y peso seco de prueba fría; así como, los componentes agronómicos del rendimiento, longitud de mazorca y el número de granos por hilera destacaron por su relación con el rendimiento; se pueden usar como criterios de selección para rendimiento en semilla de maíz.

Los análisis multivariados otorgaron la mayor ponderación a las variables de peso seco de plántula de germinación estándar y prueba fría; así como, a la germinación en esta última prueba.

Los análisis de componentes principales y de correlación canónica fueron de mayor utilidad para determinar la importancia de los caracteres agronómicos y de calidad en su relación con el rendimiento.

### 3.7 LITERATURA CITADA

- Antuna-Grijalva, O.; Rincón-Sánchez, F.; Gutiérrez del Río, E.; Ruiz-Torres, N.A. y Bustamante-García, L. 2003. Componentes genéticos de caracteres agronómicos y de calidad fisiológica de semillas en líneas de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 1:11-17.
- Ali, F.; Kanwal, N.; Ahsan, M.; Ali, Q.; Bibi, I.; and Khan N.N. 2015. Multivariate analysis of grain yield and its attributing traits in different maize hybrids grown under heat and drought stress. *Scientifica* 2015 :1-6.
- Burris, J. S. and Navratil, R. J. 1979. Relationship between laboratory cold-test methods and field emergence in maize inbreds. *Agronomy Journal* 71:985-988.
- Cervantes-Ortiz, F.; Gasca-Ortiz, M.T.; Andrio-Enríquez, E.; Mendoza-Elos M; Guevara-Acevedo, L.P.; Vázquez-Moreno, F.; Rodríguez-Herrera, S. 2014. Densidad de

- población y correlaciones fenotípicas en caracteres agronómicos y de rendimiento en genotipos de maíz. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria de México* 2:9-16.
- Cicchino, M.; Rattalino, E.J.I.; Uribelarrea, M.; Otegui, E. 2010. Heat stress in field-grown maize: response of physiological determinants of grain yield. *Crop Science* 50:1438-1448.
- Dallas, J.E. 1998. Métodos multivariados aplicados al análisis de datos. Análisis de componentes principales. Universidad del estado de Kansas. Editorial internacional Thomson. p 93.
- Duvick, D.N. 2005. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). *Advances in Agronomy* 86:83-145.
- EL-Badawy, M.E.I.M. and Mehasen, S.A.S. 2011. Multivariate analysis for yield and its components I maize under zinc and nitrogen. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 5: 3008-3015.
- Espinosa-Calderón, A.; Turrent-Fernández, A.; Tadeo-Robledo, M.; San Vicente-Tello, A.; Gómez-Montiel, N.; Valdivia-Bernal, R.; Sierra-Macías, M.; y Zamudio-González B. 2014. Ley de Semillas y ley federal de variedades vegetales y transgénicos de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5:293-308.
- García-Salazar, J. y Ramírez-Jaspeado, R. 2014. El mercado de a semilla mejorada de maíz (*Zea mays* L.) en México. Un análisis del saldo comercial por entidad federativa. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37:69-77.
- Goggi, A.S; Carage, P.; Pollak, L.; McAndrews, G.; DeVries, M. and Montgomery K. 2008. Seed quality assurance in maize breeding programs: tests to explain variations in maize inbreds and populations. *Agronomy Journal* 100:337-343.

- Hernández-Guzmán, J.A.; Carballo-Carballo, A.; Hernández-Livera, A.; González-Cossío, F.V. 2000. Ponderación de variables de calidad fisiológica para la medición del vigor en semilla de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 23:239-250.
- ISTA, Internatioal Seed Testing Association. 2005. International rules for seed testing Zurich. Switzerland.
- Kashiani, P.; Saleh, G.; Abdullah, N.A.P. y Abdullah, S.N. 2010. Variation and genetics studies on selected sweet corn inbred lines. *Asian Journal of Crop Science* 2:78-84.
- Kumar, R.; Chikkappa, G.K.; Singh, S.B.; Ganapati, M.; Kaul, J.; Das, A.K.; Sravani, D.; Olakh, D.S.; Bhatia, D. 2017. Multivariate analysis for yield and its component traits in experimental maize hybrids. *Journal of Agricultural Science* 3:219-225.
- Leibman, M.; Shryock, J.J.; Clements, M.J.; Hall, M.A.; Loida, P.J.; McClerren, A.L.; McKiness, Z.P.; Phillips, J.R.; Rice, E.A.; Stark, S.B. 2014. Comparative analysis of maize (*Zea mays*) crop performance: natural variation, incremental improvements and economic impacts. *Plant Biotechnology Journal* 12:941-950.
- León-González, A.; Llinás-Solano, H.; Tilano, J. 2008. Análisis multivariado aplicando componentes principales al caso de los desplazados. *Ingeniería & Desarrollo* 23:119-142.
- Milander, J.J. 2015. Maize yield and components as influence by environment and agronomic management. Theses, Degree of Master of Science. Agronomy and Horticulture Department, University of Nebraska-Lincoln. 1-107.
- Muhammad, R.Ch.; Rafique, M.; Hussain, A. and Altaf, M. 2010. Studies on heritability, corelation and path analysis in maize (*Zea mays* L.) *Journal Agricultural Research* 48:35-38.

- Nastasić, A.; Jocković, D.; Ivanović, M.; Stojaković, M.; Boćanski, J.; Dalović, I.; Srećkov, Z. 2010. Genetic relationship between yield and yield components of maize. *Genetika* 42:529-534.
- Pérez de la Cerda, F.J.; Córdova-Téllez, L.; Santacruz-Varela, A.; Castillo-González, F.; Cárdena-Soriano, E.; y Delgado-Alvarado, A. 2007. Relación entre vigor inicial, rendimiento y sus componentes en poblaciones de maíz chalqueño. *Agricultura Técnica de México* 33:5-17.
- Premlatha, M. and Kalamani, A. 2010. Heterosis and combining ability studies for grain yield and growth characters in maize (*Zea mays* L.). *Indian Journal of Agricultural Research* 44:62-65.
- Rahman, M.M.; Ali, M.R.; Islam M.S.; Sultan, M.K.; Mitra, B.. 1995. Correlation and path coefficient studies in maize (*Zea mays* L.) composites. *Bangladesh Journal Science* 30:87-92.
- Samadzadeh, G.E.; Lack, S.; Alavi, F.M. 2013. Analysis of correlation and stepwise regression between grain yield and related traits of corn hybrids. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 6:100-102.
- SAS, 2000. Statistical Analysis System. Software Release V 8.1. SAS Institute Inc. Cary, N.C., USA. A.
- Selvaraj, C.I. and Nagarajan, P. 2011. Interrelationship and path-coefficient studies for qualitative traits, grain yield and other yield attributes among maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Plant Breeding and Genetics* 5:209-223.

- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2014. Estadística de la producción 2014. <http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/siap/Paginas/estadistica.aspx> [Acesso em: 4 de Noviembre, 2016].
- SNICS, 2014. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. Estadísticas de producción de semillas. Disponible en: <<http://snics.sagarpa.gob.mx/certificacion/Paginas/PreciosyExistencias.aspx>>. Acceso en: 1 de Diciembre, 2016.
- Sulewska, H.; Smiatacz, K.; Szymasnska, G.; Panasiewicz, K.; Bandurska, H.; Glowicka-Woloszyn R. 2014. Seed size effect on yield quantity and quality of maize (*Zae mays* L.) cultivated in South Baltic region. *Zemdirbyste-Agriculture* 101:35-40.
- Vilela-De Souza, T.; Marque-Ribeiro, C.; Domingos-Scalon, J.; Lisboa-Guedes, F. 2014. Relação entre os componentes de produção e as características morfológicas de milho. *Magistra, Cruz das Almas* 26: 495-506.
- Virgen-Vargas, J.; Zepeda-Bautista, R.; Ávila-Perches, M.A; Espinosa-Calderón, A.; Arellano-Vázquez, J.L.; Gámez-Vázquez, A.J. 2016. Producción y calidad de semilla de maíz en Valles Altos de México. *Agronomía Mesoamericana* 27:191-206.
- Wannows, A.A.; Azzam, H.K. and Al-Ahmad S.A. 2010. Genetic variance, heritability, correlation and path coefficient analysis in yellow maize crosses. *Agriculture Biology Journal of North America* 1: 630-637.
- Yagdi K. 2009. Path coefficient analysis of some yield components in durum wheat (*Triticum Durum* Desf.). *Pakistan Journal of Botany* 41: 745-751.

Zarei, L.; Cheghamirza, K.; Farshadfar, E. 2013. Evaluation of grain yield and some agronomic characters in durum wheat (*Triticum turgidum* L.) under rainfed conditions. Australian Journal of Crop Science 7:609-617.



## **CAPÍTULO IV**

### **DISCUSIÓN GENERAL**

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más importantes en el mundo. En la actualidad, la producción de semilla a nivel mundial es un factor importante para satisfacer la demanda anual de los cultivos; además de que es una de las actividades más rentables en el campo de la agricultura (Milošević *et al.*, 2010) y que mayor cantidad de empleos genera en la producción de alimentos en México. Sin embargo, aún existe una amplia brecha entre la tecnología generada y la aplicada por el productor, entre las que destaca por su economía, la adopción de genotipos mejorados que además son amigables con el ambiente y salud de la humanidad. Por lo anterior, y dentro del proceso de multiplicación de semilla, se requiere aumentar la calidad de semilla de maíz de progenitores con altos rendimientos y estables, capaces de contrarrestar los cambios climáticos en los ambientes de producción.

En México, el maíz se produce en las regiones agroecológicas de Valles Altos (2,200-2,700 msnm), Zonas de Transición (1,800-2,200 msnm), Bajío (1,200-1,800 msnm), Trópico húmedo y Cálido seco (0-1,200 msnm) (Gómez-Montiel *et al.*, 2008; Pecina-Martínez *et al.*, 2009; Arellano-Vázquez *et al.*, 2010; Ruiz-Corral *et al.*, 2011).

Los mejoradores cuando liberan un híbrido de maíz deben proporcionar a las empresas la tecnología para el incremento y multiplicación de semilla. Dentro de las etapas del proceso de multiplicación de semilla certificada de híbridos trilineales de acuerdo con Virgen-Vargas y Arellano-Vázquez (2009) se encuentran: 1) La multiplicación de la semilla original, por el obtentor, que constituye la fase inicial en el proceso de producción de semillas calificadas (básicas, registradas y certificadas). 2) Producción de semilla básica: incremento de las líneas en lotes aislados cada una y la eliminación de plantas fuera de tipo,

antes de que las espigas derramen polen. 3) Incremento de semilla registrada: formación de la cruz simple en un lote aislado. El incremento y multiplicación de semilla registrada y certificada, está en función del rendimiento y calidad de la semilla, entendiendo por calidad de semilla la suma de atributos genéticos, físicos, fisiológicos y sanitarios que afectan la capacidad para realizar funciones vitales, relacionadas con la germinación, vigor y la longevidad (Moterle *et al.*, 2011). La *calidad genética* es la que obtiene el fitomejorador, mediante la introducción y/o cruzamiento y selección para identificar el material genético sobresaliente, por lo tanto está determinada por el genotipo de la variedad o del híbrido; la *calidad fitosanitaria* que requiere semilla libre de microorganismos, ya que representan una seria amenaza para la semilla de alta calidad; la apariencia de la semilla es reconocida como la *calidad física*, que depende del tamaño, peso hectolítrico, brillantez, pureza analítica, ausencia de semillas de malezas comunes y nocivas, y de otros cultivos; la *calidad fisiológica* está determinada por la viabilidad, germinación y vigor (Castañeda-Saucedo *et al.*, 2009), para establecer nuevos individuos, que son resultados de la expresión de factores propios del genoma de la semilla y su interacción con los factores ambientales que la rodean durante su desarrollo, cosecha y almacenamiento. El vigor es la suma de las propiedades de la semilla que terminan el potencial de una rápida y uniforme emergencia, y el desarrollo de las plántulas normales bajo un amplio rango de condiciones en el campo.

En el proceso de incremento y producción existen diferentes factores principalmente ambientales (heladas, granizadas e intensidad de lluvias, entre otros factores) que no permiten a las empresas productoras de semillas en algunas ocasiones cumplir con su programación en la producción de semilla principalmente en Valles Altos por ser una zona donde solo se tiene un ciclo de producción en maíz. Por lo que es importante conocer la estabilidad del rendimiento y la interacción genotipo ambiente en características de calidad

física y fisiológica de maíz en progenitores de híbridos trilineales para la identificación de localidades alternativas de producción, que permitan cumplir con los estándares de producción requeridos. Para esto es importante identificar localidades alternativas que permitan a las pequeñas empresas nacionales incrementar y producir semilla de calidad para abastecer las necesidades de los productores; sin embargo, es importante considerar la estabilidad y la interacción genotipo ambiente, parámetros importantes en la producción e incremento de progenitores de semilla. La estabilidad agronómica (Becker, 1981) es cuando existe una mínima interacción genotipo ambiente, asociada a obtener un incremento del rendimiento en respuesta a mejores condiciones ambientales durante su evaluación; y la interacción genotipo ambiente es el comportamiento diferencial de los genotipos en los ambientes de producción.

Considerando las diferentes zonas de producción de maíz en nuestro país, es conveniente determinar la estabilidad del rendimiento y la interacción genotipo-ambiente en las características de calidad física y fisiológica de semilla de líneas y cruzas simples progenitoras de híbridos trilineales de maíz adaptados a Valles Altos de México; y determinar la correlación de los caracteres agronómicos y de calidad física y fisiológica para identificar los que están más asociados al rendimiento. Esta información permitirá la producción e incremento de semilla de calidad de genotipos progenitores de híbridos de Valles Altos en localidades alternativas de producción en las zonas de Transición y Bajío.

#### **4.1. Estabilidad del rendimiento de semilla de líneas y cruzas simples progenitoras de híbridos trilineales de maíz.**

La estabilidad y la interacción genotipo-ambiente (IGA) son aspectos importantes que se deben de considerar para la generación de tecnología adecuada para la producción e

incremento de semilla de maíz en nuevas áreas. De las localidades Coatlinchán (Valles Altos), Celaya (Bajío) y San Luis de la Paz (Transición); Celaya 2014 fue el ambiente más contrastante, con mayor temperatura, menor altitud y precipitación, a diferencia de los ambientes de Valles Altos y Zona de Transición. Gauch y Zobel, (1997) mencionan que el ambiente representa aproximadamente el 80 % del total de la variación en los ensayos multiambientes. Los ambientes de Valles Altos, presentaron las mejores condiciones para la expresión del rendimiento; lo cual se explica porque los progenitores fueron seleccionados y evaluados para generar híbridos trilineales adaptados para la producción en esta mega región (Setimela *et al.*, 2007). La variación de rendimiento (1.8-5.7 t ha<sup>-1</sup>), floración masculina (69.4-80.9 días) y altura de planta (1.4-2.5 m) explicada por los ambientes indica que los entornos ecológicos fueron diversos. El mejor ambiente para la expresión del rendimiento fue Coatlinchán, seguido de San Luis de la Paz, por lo que la localidad de Celaya fue la de menor rendimiento, por estar ubicada en un mega ambiente diferente (Bajío mexicano), es decir con diferente altitud (1767 msnm), temperaturas y precipitación.

Las líneas endogámicas hembra de mayor rendimiento fueron M-47 y M-55 ( $p \leq 0.05$ ), y de las líneas macho M-48, M-52 y M-46; las líneas de menor rendimiento fueron M-54, CML-242 y M-44. La cruce simple hembra M-47xM-46 presentó el mayor rendimiento y de los híbridos el H-70 coincidiendo con lo reportado para este híbrido por Arellano-Vázquez *et al.* (2011); el mayor rendimiento de los híbridos se asocia con la combinación de progenitores derivados de diferentes orígenes geográficos, por lo que probablemente la heterosis sea definitiva en la expresión del rendimiento (Tollenaar *et al.*, 2004). Márquez (1992), menciona que la respuesta de los cultivares, al evaluarlos en diferentes ambientes es muy variable, lo cual depende de la diversidad genética de cada

cultivar; un cultivar heterogéneo genéticamente (heterocigótico) puede tener una mayor adaptabilidad que uno homogéneo (homocigótico).

En general, las líneas hembras presentaron un rendimiento mayor (500 kg), fueron más precoces (2.9 días) así como también presentaron una mayor altura (40 cm) a diferencia de las líneas macho. Las cruza simples hembras presentaron un menor rendimiento (1800 kg) y fueron más precoces (1.3 días) a diferencias de los híbridos trilineales.

Los progenitores de origen Michoacán, M-44, M-46, M-43 y M-54 presentaron mayor número de días a floración entre ambientes, debido a la sensibilidad de los genotipos ocasionada por el fotoperiodo y temperaturas templadas de los ambientes de evaluación Coatlinchán y San Luis de la paz (16 y 17 °C) que alargan las etapas de desarrollo y floración a diferencia de la temperatura (20 °C) de su lugar de origen (Craufurd y Wheeler, 2009). Los híbridos presentaron mayor precocidad, lo que se atribuye al vigor híbrido según Noriega-González *et al.* (2011).

De los híbridos trilineales, el más estable fue el H-66, mientras que el que más interaccionó con el ambiente fue el H-70, con mayor repuesta a ambientes favorables. Las líneas con comportamiento predecible, clasificadas como estables fueron la M-55, M-52 y M-54; la CS hembra M-43xM-44 y el híbrido H-66 mientras que M-46, CML-242, M-43, M-44 y M-48 mostraron menor estabilidad, en tanto que M-47 se clasificó como un genotipo poco predecible o inestable.

En cuanto a la producción de semilla de las cruza simples y de los híbridos trilineales, de acuerdo con estos resultados, se puede realizar en las localidades de Coatlinchán (2300 msnm) y San Luis de la Paz (1100 msnm), ambientes representativos de Valles Altos y de la Zona de Transición.

## **4.2. Interacción genotipo ambiente en la calidad física y fisiológica de semilla de progenitores de híbridos de maíz**

En cualquier sistema de cultivo, la germinación y el vigor de la semilla son los atributos importantes de la calidad para asegurar la emergencia uniforme y el establecimiento de un cultivo (De Geus *et al.*, 2008); sin embargo, estos factores están influenciados por las características físicas de la semilla (Sulewska *et al.*, 2014); que a su vez, se relacionan con el manejo agronómico y con las condiciones climáticas que se presentan durante el desarrollo del cultivo (Fernández-Sosa *et al.*, 2015); la calidad está altamente influenciada por la temperatura (Abdullah *et al.*, 2001), humedad, fertilidad del suelo, nutrición de la planta madre y la presencia de patógenos (EnayatGholizadeh *et al.*, 2012), aspectos comunes y de mayor efecto en la floración, maduración y cosecha.

Las condiciones ambientales influyeron sobre las características de calidad física y fisiológica; en calidad física los mejores ambientes fueron San Luis de la Paz 2014 en peso de mil semillas (295.3 g), Coatlinchán 2015 en peso hectolítrico (74.7 kg hL<sup>-1</sup>), Coatlinchán 2014 y San Luis de la Paz 2014 en porcentaje de semilla comercial (76.0 y 73.3 %). De acuerdo a Milošević *et al.* (2015) el tamaño de la semilla, lo determina el entorno de producción, las prácticas de cultivo y la genética de las variedades, pues el desarrollo de la semilla es dependiente de la acumulación de materiales nutritivos, correlacionados directamente con el vigor, es decir, con el tamaño y la masa de la semilla.

La línea endogámica hembra de mayor PMS fue M-55, con 247.2 g; valores más altos (292.02 g) han sido reportados en líneas progenitoras de híbridos de maíz en Valles Altos de México (Virgen-Vargas *et al.*, 2014). La hembra de menor PMS fue M-47. De las líneas macho, la de mayor PMS (286.5) fue la M-48, seguida de M-46 y M-54; las líneas machos

con menor PMS fueron M-52 y M-44. La CS M-43xM-44 superó en PMS, a sus similares. En la producción de semilla híbrida es importante conocer el número de semillas por kilogramo para determinar la densidad de población de progenitor hembra y macho (Virgen-Vargas *et al.*, 2014). El H-70 presentó el mayor PMS (319.0 g) y el más alto % SC, ya que el PMS es un indicador del tamaño de semilla. La línea hembra M-47 expresó mayor peso hectolítrico (74.1 kg hL<sup>-1</sup>), seguida de M-55 y M-43, y la línea macho M-48 presentó mayor PH (75.9 kg hL<sup>-1</sup>), superando a sus similares. En este tema Virgen-Vargas *et al.* (2016), reportaron que las líneas progenitoras de híbridos para Valles Altos en la localidad de Tlaxcala mostraron un PH inferior (71.75 kg hL<sup>-1</sup>) a los obtenidos en esta evaluación. Vázquez *et al.* (2012) al evaluar la calidad de maíz para la industria de la masa y la tortilla en híbridos y variedades en localidades de Valles Altos Centrales de México, reportaron PH inferiores (74.1 kg hL<sup>-1</sup>), al obtenido en este trabajo para el H-70.

Para la variable semilla comercial, la línea hembra y la CSH de mayor expresión fueron las progenitoras del híbrido H-70. La línea macho M-44 progenitora de la CSH del H-66 presentó el mayor valor de %SC (82.4 %), esta variable presentó una correlación alta ( $r = 0.75$ ) con el PMS.

En la %GPGE la línea hembra de mayor germinación fue la M-47 (89 %), y de las líneas endogámicas macho, la M-48 (90 %), progenitores del H-44; las líneas macho CML-242 (76 %) y M-54 (78 %) presentaron los valores más bajos de germinación, respuesta asociada a los primeros signos de desorganización y pérdida de la integridad del sistema de la membrana celular causado por la peroxidación de lípidos reduciendo así el potencial fisiológico de la semilla (Filho, 2015); como consecuencia de la depresión endogámica por el aumento de la frecuencia de los homocigotos (De Farias y Miranda, 2000) a diferencia de

los híbridos. La CSH del H-70 superó a sus similares, H-44 y H-66, en porcentaje de germinación. En la producción de semilla el criterio de germinación estándar en laboratorio al momento de la certificación para líneas se realiza de acuerdo a las inspecciones y tolerancias de campo y la calidad de la línea es responsabilidad del productor; para la producción de semilla de líneas, cruzas simples e híbridos en la categoría básica, registrada y certificada es aceptado como mínimo el 90 % de germinación, de acuerdo a los resultados de la evaluación todos los genotipos cumplen con este criterio a excepción de la M-47xM-46 (SNICS, 2013). En el %GPF la línea hembra M-47 (71 %) y la línea macho M-48 (83 %), progenitores del H-44 mostraron los mayores valores coincidiendo con la %GPGE; considerándose como genotipos con buen potencial fisiológico para realizar sus funciones vitales, en condiciones ambientales favorables y desfavorables (Filho, 2015). La CSH del H-66 superó a sus similares, la línea hembra M-43 (68 %) y la línea macho M-54 (57 %), que presentaron valores bajos de porcentaje de germinación en la prueba después del estrés de frío.

Los genotipos más estables en peso de mil semillas, fueron la crusa simple M-47xM-46 y la línea M-55. Los genotipos H-66, H-44, M-43xM-44 y M-55xM-54 presentaron adaptación específica a SLP 2015, en respuesta a que las condiciones de temperatura y altitud fueron similares al ambiente para el que fueron generadas (Valles Altos) a diferencia de Celaya; para la variable peso hectolítrico el H-70, M-48, M-47xM-46, M-43xM-44 y M-43 fueron los más estables. Los resultados concuerdan con los obtenidos por Vázquez-Carrillo *et al.* (2012a), para el híbrido H-70, al evaluar el efecto de IGA en características físicas del grano en 20 híbridos en localidades de Valles Altos de Tlaxcala México. El genotipo M-47 mostró un comportamiento específico superior en los ambientes Coatlinchán 2014 y Coatlinchán 2015; el H-44 y H-66 en San Luis de la Paz 2015; el



CML-242 y M-55xM-54 en Celaya 2014. En la expresión de semilla comercial los genotipos más estables fueron el H-66, M-43xM-44, H-44, CML-242, M-47xM-46 y M-55xM-54. El genotipo M-46 mostró un comportamiento específico superior al ambiente COA 2014. Para el porcentaje de germinación estándar los materiales más estables fueron M-47xM-46, M-43xM-44, H-66, M-55 y M-52; el genotipo M-55 mostró un mejor comportamiento específico en San Luis de la Paz 14 y M-47 en Celaya 2014. En porcentaje de germinación después prueba fría el genotipo más estable en la tolerancia al frío fue M-43xM-44, por su mayor resistencia de siembra en suelos con temperaturas bajas (10 °C) a diferencia del resto de los genotipos. El híbrido H-70 presentó el mayor porcentaje de germinación después del estrés de frío en Celaya 2014; el genotipo M-55xM-54 mostró un comportamiento específico al ambiente Coatlinchán 2014 y el genotipo más inestable fue la línea M-54.

#### **4.3. Calidad física y fisiológica de maíz y su relación con el rendimiento y sus componentes.**

De las variables agronómicas, rendimiento y sus parámetros, calidad física y fisiológica, el rendimiento presentó mayor heterogeneidad de datos y el valor mínimo de variación lo presentaron las variables floración femenina y peso hectolítrico. De acuerdo a lo mencionado por Zarei *et al.* (2013) para que un rasgo sea considerado como criterio de selección debe estar relacionado con el rendimiento. Vilela-De Souza *et al.* (2014) mencionan que el estudio de correlaciones bivariadas, es sólo una medida de asociación que no permite obtener conclusiones sobre las relaciones de causa y efecto, por lo que es recomendable utilizar otras metodologías para determinar la correlación entre variables.

Se utilizaron tres metodologías que fueron la correlación de Pearson, Componentes principales y correlaciones canónicas para determinar la asociación de los caracteres evaluados con rendimiento, los coeficientes de correlación de Pearson detectaron valores significativos ( $p < 0.01$ ) entre todas las variables con rendimiento, a excepción del %SC, las variables de mayor importancia fueron PSPGE, PSPF y %GPF, las cuales generaron la mayor variabilidad en el análisis de componentes principales y destacaron en el análisis de correlación canónica, así mismo dentro de las variables agronómicas, las de mayor relevancia en estos dos últimos métodos fueron LM y NGH. Los resultados coinciden con los de Cervantes-Ortiz *et al.* (2014) y Pérez de la Cerda *et al.* (2007) que reportaron correlación positiva entre el vigor inicial y el rendimiento de grano en genotipos de maíz. Nastasić *et al.* (2010) mencionan que existe una correlación significativa del rendimiento con el NGH y la LM. Al respecto, Goggi *et al.* (2008) mencionan que la calidad de semilla es un factor importante que determina el desarrollo y crecimiento de un cultivo, por lo que se debe considerar para mejorar el rendimiento.

Se ha reportado que el peso seco de plántula es una variable importante para predecir el establecimiento en campo en condiciones favorables e intermedias (Hernández *et al.*, 2000), lo cual está relacionado con el rendimiento. Antuna-Grijalva *et al.* (2003) indican que no existe asociación directa y significativa entre caracteres agronómicos y de calidad de semilla, al estudiar los caracteres fenotípicos y efectos genéticos. El rendimiento puede aumentarse mejorando caracteres como la LM, ya que presenta un efecto directo positivo y una correlación significativa con el rendimiento de semilla y el NGH tiene una correlación genética positiva con el rendimiento (Kashiani *et al.*, 2010; Samadzadeh, 2013) en líneas de maíz dulce de progenitores e híbridos de maíz (Selvaraj y Nagarajan, 2011).

No obstante que el %SC, no presentó asociación con rendimiento, es importante mencionar que es un parámetro importante en la producción y rentabilidad de las semillas (Virgen-Vargas *et al.*, 2016).

#### 4.4 Literatura citada

- Abdullah, Z.; Khan, M. A.; Flowers, T. J. 2001. Causes of sterility in seed set of rice under salinity stress. *Journal Agronomy & Crop Science* 187:25-32. DOI: 10.1046/j.1439-037X.2001.00500.x.
- Antuna-Grijalva, O.; Rincón-Sánchez, F.; Gutiérrez del Río, E.; Ruiz-Torres, N.A. y Bustamante-García, L. 2003. Componentes genéticos de caracteres agronómicos y de calidad fisiológica de semillas en líneas de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 1:11-17.
- Arellano-Vázquez, J.L.; Virgen-Vargas, J.; Ávila-Perches, M.A. 2010. H-66 híbrido de maíz para los Valles Altos de los estados de México y Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1:257-26.
- Arellano-Vázquez, J.L.; Virgen-Vargas, J.; Rojas-Martínez, I.; Ávila-Perches, M.A. 2011. H-70: Híbrido de maíz de alto rendimiento para temporal y riego del Altiplano Central de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:619-626.
- Becker, H.C. 1981. Correlations among some statistical measures of phenotype stability. *Euphytica* 30:835-840.
- Castañeda-Saucedo, M.C.; López-Castañeda.C.; Colinas-De León, M.T.B.; Molina-Moreno, J.C.; Hernández-Livera, A. 2009. Rendimiento y calidad de la semilla de cebada y trigo en campo e invernadero. *Interciencia* 34:286-292.

- Cervantes-Ortiz, F.; Gasca-Ortiz, M.T; Andrio-Enríquez, E.; Mendoza-Elos M.; Guevara-Acevedo, L.P.; Vázquez-Moreno, F.; Rodríguez-Herrera, S. 2014. Densidad de población y correlaciones fenotípicas en caracteres agronómicos y de rendimiento en genotipos de maíz. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria de México* 2:9-16.
- Craufurd, P.Q.; Wheeler, T.R. 2009. Climate change and the flowering time of annual crops. *Journal of Experimental Botany* 60:2529-2539.
- De Farias, N.A.L.; De Miranda, F. J. B. 2000. Inbreeding in two maize subpopulations selected for tassel size. *Scientia Agricola* 57:487-490.
- De Geus, Y.N.; Goggi, S.A.; Pollak, L.M. 2008. Seed quality of high protein corn lines in low input and conventional farming systems. *Agronomy for Sustainable Development* 28:541-550. DOI: 10.105 1/agro.2008023.
- EnayatGholizadeh, M.R.; Bakhshandeh, A.M.; Shoar Dehgan M; Ghaineh, M.H.; Alami Saeid K.H.; Sharafizadeh M. 2012. Effect of source and seed size on yield component of corn S.C704 in Khuzestan. *African Journal of Biotechnology* 11: 2938–2944. DOI: 10.5897/AJB11.2720.
- Fernández-Sosa, R.; Carballo-Carballo, A.; Villaseñor-Mir, H.E.; Hernández-Livera, A. 2015. Calidad de la semilla de trigo de temporal en función del ambiente de producción. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6:1239-1251.
- Filho, J.M. 2015. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. *Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.)* 72:363-374. DOI:10.1590/0103-9016-2015-0007.
- Gauch, Jr. H.G.; Zobel, R.W. 1997. Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science* 37:311–326.

- Goggi, A.S.; Caragea, P.; Polla, L.; McAndrews, G.; DeVries, M.; Montgomery, K. 2008. Seed quality assurance in maize breeding programs: Tests to explain variations in maize inbreds and populations. *Agronomy Journal* 100:337-343.
- Gómez-Montiel, N.O.; Sierra-Macías, M.; González-Camarillo, M.; Cantú-Almaguer, M.A.; Ramírez-Fonseca, A.; Wong-Pérez, J.J.; Manjarrez-Salgado, M.; Ramírez-Díaz, J.L.; Espinosa-Calderón, A. 2008. H-562, Híbrido de maíz de alto rendimiento para el trópico húmedo y seco de México. *Agricultura Técnica México* 34:101-105.
- Hernández-Guzmán, J.A.; Carballo-Carballo, A.; Hernández-Livera, A.; González-Cossío, F.V. 2000. Ponderación de variables de calidad fisiológica para la medición del vigor en semilla de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 23:239-250.
- Kashiani, P.; Saleh, G.; Abdullah, N.A.P. y Abdullah, S.N. 2010. Variation and genetics studies on selected sweet corn inbred lines. *Asian Journal of Crop Science* 2:78-84.
- Márquez S.F. 1992. La interacción genético-ambiental en genotecnia vegetal. Revisión. En: Simposio interacción genotipo-ambiente en genotecnia vegetal. SOMEFI. Guadalajara, Jalisco, México, p1-27.
- Milošević, M.; Vujakovic, M.; Karagic, D. 2015. Vigour test as indicators of seed viability. *Genetika* 42:103-118. DOI: 10.2298/GENSR1001103M.
- Moterle, L.M.; Braccin, A.L.; Scapim, C.A.; Pinto, R.J.B.; Gonçalves, L.S.; Amaral Junior, A.T.; Silva, T.R.C. 2011. Combining ability of tropical maize lines for seed quality and agronomic traits. *Genetics and Molecular Research* 10:2268-2278. DOI: 10.4238/vol10-3gmr1129.
- Nastasić, A.; Jocković, D.; Ivanović, M.; Stojaković, M.; Boćanski, J.; Dalović, I.; Srećkov, Z. 2010. Genetic relationship between yield and yield components of maize. *Genetika* 42:529-534.

- Noriega-González, L.A.; Preciado-Ortiz, R.E.; Enríquez E.A.; Terrón-Ibarra, A.D.; Covarrubias-Prieto, J. 2011. Fenología, crecimiento y sincronía floral de los progenitores del híbrido de maíz QPM H-374C. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:489-500.
- Pecina-Martínez, J.A.; Mendoza-Castillo, M.C.; López-Santillán, J.A.; Castillo-González, F.; Mendoza-Rodríguez, M. 2009. Respuesta morfológica y fenológica de maíces nativos de Tamaulipas a ambientes contrastantes de México. *Agrociencia* 43: 681-694.
- Pérez de la Cerda, F.J.; Córdova-Téllez, L.; Santacruz-Varela, A.; Castillo-González, F.; Cárdena-Soriano, E.; y Delgado-Alvarado, A. 2007. Relación entre vigor inicial, rendimiento y sus componentes en poblaciones de maíz chalqueño. *Agricultura Técnica de México* 33:5-17.
- Ruiz-Corral, J.A.; Medina-García, G.; Ramírez-Díaz, J.L.; Flores-López, H.E.; Ramírez-Ojeda, G.; Manríquez-Olmos, J.D.; Zarazúa-Villaseñor, P.; González-Eguiarte, D.R.; Díaz-Padilla, G.; De la Mora-Orozco, C. 2011. Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:309-323.
- Samadzadeh, G.E.; Lack, S.; Alavi, F.M. 2013. Analysis of correlation and stepwise regression between grain yield and related traits of corn hybrids. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 6:100-102.
- Selvaraj, C.I. and Nagarajan, P. 2011. Interrelationship and path-coefficient studies for qualitative traits, grain yield and other yield attributes among maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Plant Breeding and Genetics*, 5: 209-223.

- Setimela, P.S.; Vivek, B.; Bänziger, M.; Crossa, J.; Maiden, F. 2007. Evaluation of early to medium maturing open pollinated maize varieties in SADC region using GGE biplot based on the SREG model. *Field Crops Research Soil* 103: 161-169.
- Sulewska, H.; Śmiatacz, K.; Szymańska, G.; Panasiewicz, K.; Bandurska H.; Głowicka-Wołoszyn, R. 2014. Seed size effect on yield quantity and quality of maize (*Zea mays* L.) cultivated in South East Baltic region. *Zemdirbyste-Agriculture* 101: 35–40. DOI 10.13080/z-a.2014.101.005.
- Tollenaar, M.; Ahmadzadeh A.; Lee, E.A. 2004. Physiological basis of heterosis for grain yield in maize. *Crop Science* 44:2086-2094.
- Vázquez-Carrillo, M.G.; Mejía-Andrade, H.; Tut-Couoch, C.; Gómez-Montiel, N. 2012. Características de granos y tortillas de maíces de alta calidad proteínica desarrollados para los Valles Altos Centrales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:23-31.
- Vázquez-Carrillo, M.G.; Santiago-Ramos, D.; Salinas-Moreno, M.Y.; Rojas-Martínez, I.; Arellano-Vázquez, J.L.; Velázquez-Cardelas, G.A.; Espinosa-Calderón, A. 2012a. Interacción Genotipo-Ambiente del rendimiento y calidad del grano y tortilla de híbridos de maíz en Valles Altos de Tlaxcala, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:229-237.
- Vilela-De Souza, T.; Marque-Ribeiro, C.; Domingos-Scalon, J.; Lisboa-Guedes, F. 2014. Relação entre os componentes de produção e as características morfológicas de milho. *Magistra, Cruz das Almas* 26:495-506.
- Virgen-Vargas, J. y Arellano-Vázquez, J.L. 2009. Etapas y reglas de calificación en la producción de semillas del H-66E. *Campo Experimental Valle de México*. INIFAP. México. Desplegable informativa 3. p.3.
- Virgen-Vargas, J.; Zepeda-Bautista, R.; Ávila-Perches M.A.; Espinosa-Calderón, A.; Arellano-Vázquez, J.L.; Gámez-Vázquez, A.J. 2014. Producción de semillas de líneas

progenitoras de maíz: densidad de población e interacción. *Agronomía Mesoamericana* 25:323-335.

Virgen-Vargas, J.; Zepeda-Bautista, R.; Ávila-Perches, M.A; Espinosa-Calderón, A.; Arellano-Vázquez, J.L.; Gámez-Vázquez, A.J. 2016. Producción y calidad de semilla de maíz en Valles Altos de México. *Agronomía Mesoamericana* 27:191-206.

Zarei, L.; Cheghamirza, K.; Farshadfar, E. 2013. Evaluation of grain yield and some agronomic characters in durum wheat (*Triticum turgidum* L.) under rainfed conditions. *Australian Journal of Crop Science* 7:609-617.



## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES GENERALES**

Con base a las condiciones experimentales en las que se desarrolló la presente investigación y a los resultados obtenidos se concluye:

Es posible producir semilla de progenitores, cruzas simples y líneas, y grano de híbridos trilineales adaptados a los Valles Altos Centrales de México en las localidades de Celaya y San Luis de la Paz, Guanajuato; ya que presentaron estabilidad en el rendimiento, por lo que se consideran como localidades alternativas a los Valles Altos Centrales, con características aptas para la producción de semilla.

La línea macho M-48 mostró una mejor adaptación específica por lo que se puede producir con éxito en Celaya, y la CS hembra M-47xM-46 en San Luis de la Paz.

El híbrido H-70 se comportó de manera inestable o poco predecible, con mejor repuesta a ambientes favorables; la CS hembra M-55xM-54 y la línea femenina M-47 fueron poco predecibles o inestables.

La CS hembra M-47xM-46 progenitor del H-44, las líneas endogámicas femeninas M-47 y M-55, progenitores de los híbridos H-44 y H-70 respectivamente, presentaron un mayor rendimiento. La línea hembra con menor REN fue la M-43 progenitor del H-66. La línea macho de mayor REN fue la M-48 progenitora del H-44.

La sincronía de la floración de las líneas endogámicas, para formar las cruzas simples, fue mejor en H-66 con un día de diferencia; sin embargo, su progenitor hembra M-43xM-44 y la línea M-43 presentaron la mayor altura de planta.

El progenitor M-47xM-46 presentó estabilidad en calidad física y M-43xM-44 fue el más estable en calidad fisiológica, por lo que se puede realizar la producción de semilla con calidad de estos progenitores utilizando como localidades alternativas a San Luis de la Paz y Celaya, Guanajuato. Los progenitores M-43xM-44, M-55xM-54, CML-242 y los híbridos H-44 y H-66 fueron estables en el porcentaje de semilla comercial, este carácter es de gran utilidad para predecir el rendimiento.

Los progenitores M-47xM-46, M-55, M-52 y el híbrido H-66 presentaron estabilidad en germinación estándar. La producción de los híbridos H-66 y H-44, se sugiere realizarla en localidades con altitudes de 2,000 msnm, ya que mostraron estabilidad específica al ambiente SLP 2015, en peso hectolítrico y de mil semillas. El híbrido H-70 en general presentó la mejor respuesta para calidad física y fisiológica; sin embargo, se comportó como un híbrido poco predecible, con mayor respuesta a ambientes favorables.

Los análisis multivariados otorgaron la mayor ponderación a los rasgos de calidad fisiológica de peso seco de plántula en germinación estándar y prueba fría, así como a la germinación en la prueba frío; y los componentes agronómicos longitud de mazorca y el número de granos por hilera destacando como criterios de selección indirecta.