



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENETICA

RENDIMIENTO Y CONTENIDO DE PROLINA EN MAÍZ MEJORADO POR SELECCIÓN MASAL PARA RESISTENCIA A SEQUÍA

MARÍA DE LOS ANGELES ACEVEDO CORTÉS

T E S I S

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

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2012

La presente tesis titulada: **Rendimiento y contenido de prolina en maíz mejorado por selección masal para resistencia a sequía**, realizada por la alumna: **María de los Ángeles Acevedo Cortés**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENETICA**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



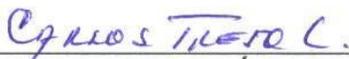
DR. J. JESUS GARCIA ZAVALA

ASESOR



DR. JOSÉ APOLINAR MEJÍA CONTRERAS

ASESOR



DR. CARLOS TREJO LÓPEZ

ASESOR

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Mayo de 2012

DEDICATORIA

A mi creador (Dios), a quien debo la vida y lo que soy.

A pesar de apartarme por mucho tiempo de él, nunca me dejó sola.

A mis padres: **José Acevedo Moreno y Nicasia Cortés Hernández** con todo mi amor y admiración, quienes me han apoyado incondicionalmente.

A mí querida hermana **Ruvid Acevedo Cortés**, que siempre ha estado ahí ayudándome, alentándome a seguir adelante y ser mejor cada día.

A mi esposo **Alfredo López Rueda** por su amor, apoyo y comprensión.

A mis hijos **Dulce Esmeralda y José Esteban** por su paciencia y amor, quienes impulsan mis deseos de superación.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a **Dios** por todo lo que ha hecho por mí, aun sin merecer su amor, él permanece a mi lado.

A todo el pueblo de México, quien a través del **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, me brindó una beca para mi formación como Maestra en Ciencias en el Colegio de Postgraduados.

Al **Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT)** por otorgarme una beca para la realización de esta tesis.

Al **Colegio de Postgraduados**, por brindarme la oportunidad de llevar acabo mis estudios en su programa de Genética.

A mi consejo particular

Dr. J. Jesús Garcia Zavala por su invaluable apoyo, paciencia, dedicación, dirección de la investigación y sobretodo amistad sincera, otorgada durante mi formación.

Dr. José D. Molina Galán por sus consejos, amistad, material experimental y sugerencias para realizar el trabajo de investigación.

Dr. Carlos Trejo López por su dirección, tiempo, paciencia, amistad y aportes para mejorar la calidad del trabajo de investigación.

Dr. José Apolinar Mejía Contreras por su amable colaboración y sugerencias

Dr. Ricardo Lobato Ortiz por su apoyo y consejos.

A los profesores de Genética que con paciencia y disposición transmitieron sus conocimientos.

A la Sra. Dalila por su amistad y apoyo incondicional como alumna del programa.

A mi **familia** por su amor y apoyo brindado siempre.

A la M.C. Leticia Escobedo, por amistad y ánimo a superarme profesionalmente.

A mi amiga incondicional la Ing. Reyna Rojas por su amistad sincera y palabras de ánimo.

A los Ingenieros Ulises y Martha por su confianza.

Al grupo de trabajo de campo del Dr. Molina, Sres. Carlos y Abelino, por sus consejos y apoyo.

A Ana, quien me apoyó en laboratorio en el presente estudio.

A mis compañeros y amigos José Luis, Martha, Marisol, Ulises M, Dolores, Dalila, Darío, Adrián, Arce, Fran, Marce y May.

A todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron a culminar mis estudios.
Gracias.

CONTENIDO GENERAL

	Pág.
CONTENIDO GENERAL	i
Índice de cuadros	ii
Índice de figuras.....	v
Índice de cuadros del apéndice	vi
Índice de figuras del apéndice.....	vii
Resumen general.....	ix
Abstract.....	xi
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Objetivos	6
1.2 Hipótesis	7
CAPITULO II. RENDIMIENTO Y RESPUESTA A LA SELECCIÓN MASAL EN MAÍZ PARA RESISTENCIA A SEQUÍA	8
2.1 Resumen.....	8
2.2 Abstract.....	9
2.3 Introducción.....	10
2.4 Materiales y métodos	13
2.5 Resultados.....	17
2.6 Discusión.....	31
2.7 Conclusiones	36
2.8 Literatura citada.....	37
CAPITULO III. RENDIMIENTO Y CONTENIDO DE PROLINA EN MAÍZ SELECCIONADO PARA RESISTENCIA A SEQUÍA	40
3.1 Resumen.....	40

3.2 Abstract.....	42
3.3 Introducción.....	44
3.4 Materiales y métodos.....	47
3.5 Resultados.....	54
3.6 Discusión.....	67
3.7 Conclusiones.....	73
3.8 Literatura citada.....	74
CAPITULO IV. DISCUSIÓN GENERAL.....	78
CAPITULO V. LITERATURA CITADA GENERAL.....	80
CAPITULO VI. APÉNDICE.....	86

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Pág.
2.1 Estructura del análisis de varianza por ambiente. CP-2010, Montecillo, México.....	16
2.2 Estructura del análisis de varianza combinado de ambientes. CP-2010, Montecillo, México.....	16
2.3 Cuadrados medios y coeficientes de variación del análisis de varianza combinado de tres ambientes de diecisiete caracteres de la evaluación de ciclos de Zacatecas 58 y testigos. CP-2010, Montecillo, México.....	19
2.4 Cuadrados medios y coeficientes de variación del análisis de varianza combinado de tres ambientes de diecisiete caracteres de la evaluación de ciclos de Cafime y testigos. CP-2010, Montecillo, México.....	20
2.5 Cuadrados medios y coeficientes de variación del análisis de varianza	22

	combinado de tres ambientes de diecisiete caracteres de la evaluación de ciclos de Zacatecas 58, ciclos de Cafime, y testigos. CP-2010, Montecillo, México.....	
2.6	Cuadrados medios y coeficientes de variación del análisis de varianza combinado de tres ambientes de diecisiete caracteres de la evaluación de los ciclos de Zacatecas 58 y de los ciclos de Cafime. CP-2010, Montecillo, México.....	23
2.7	Comportamiento promedio de diecisiete caracteres de los ciclos de selección de Zacatecas 58 y de los testigos. Análisis combinado de tres ambientes. CP 2010, Montecillo, México.....	25
2.8	Comportamiento promedio de diecisiete caracteres de los ciclos de selección de Cafime y de los testigos. Análisis combinado de tres ambientes. CP 2010, Montecillo, México.....	26
2.9	Coefficientes de correlación fenotípica entre rendimiento y sus componentes en Zacatecas 58 y Cafime del análisis combinado de ambientes. CP 2010, Montecillo, México.....	28
2.10	Coefficientes de correlación fenotípica entre rendimiento y caracteres agronómicos en Zacatecas 58 y Cafime del análisis combinado de ambientes. CP 2010, Montecillo, México.....	28
2.11	Coefficientes de regresión lineal simple del rendimiento sobre ciclos de selección en Zacatecas 58 y en Cafime, en los ambientes riego, sequía, temporal y combinado de ambientes	29
3.1	Estructura del análisis de varianza por ambiente. CP-2010, Montecillo, México.....	49
3.2	Estructura del análisis de varianza combinado de ambientes. CP-2010, Montecillo, México.....	50
3.3	Cuadrados medios y coeficientes de variación del análisis de varianza individual por ambientes de la variedad Zacatecas 58 y de la variedad	55

	Cafime incluyendo testigos. CP-2010, Montecillo, México.....	
3.4	Cuadrados medios y coeficientes de variación del análisis de varianza individual por ambientes de los ciclos de Zacatecas 58 más los de Cafime. CP-2010, Montecillo, México.....	55
3.5	Cuadrados medios y coeficientes de variación del análisis de varianza combinados de la variedad Zacatecas 58 y de la variedad Cafime, incluyendo testigos. Y Zacatecas 58 más Cafime. CP-2010, Montecillo, México.....	56
3.6	Comportamiento promedio del rendimiento por ambiente y combinado de ambientes de Zacatecas 58 y de los testigos. CP 2010, Montecillo, México.....	57
3.7	Comportamiento promedio del rendimiento por ambiente y combinado de ambientes de Cafime y de los testigos. CP 2010, Montecillo, México.....	57
3.8	Coefficientes de regresión lineal simple del rendimiento sobre ciclos de selección en Zacatecas 58 y en Cafime, en tres ambientes y combinado de ambientes.....	58
3.9	Contenido promedio de prolina en genotipos evaluados en riego y sequía y comparación entre promedios.....	64
3.10	Comparación entre el promedio del ciclo cero y el de ciclos avanzados en Zacatecas 58 y Cafime, y comparación entre el promedio de ciclos avanzados y el de testigos para contenido de prolina en ambiente de sequía.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Pág.
2.1	Regresión lineal simple del rendimiento sobre los ciclos de selección de Zacatecas 58. Análisis combinado de tres ambientes.....	29
2.2	Regresión lineal simple del rendimiento sobre los ciclos de selección de Cafime. Análisis combinado de tres ambientes.....	30
3.1	Regresión lineal simple del rendimiento sobre los ciclos de selección de Zacatecas 58. Análisis combinado de tres ambientes.....	59
3.2	Regresión lineal simple del rendimiento sobre los ciclos de selección de Cafime. Análisis combinado de tres ambientes.....	59
3.3	Concentración de prolina en la tercera hoja ligulada.....	61
3.4	Regresión lineal simple del contenido de prolina sobre los ciclos de selección de Zacatecas 58 bajo condiciones de sequía en invernadero.....	63
3.5	Regresión lineal simple del contenido de prolina sobre los ciclos de selección de Cafime bajo condiciones de sequía en invernadero.....	63
3.6	Regresión lineal simple del contenido de prolina sobre rendimiento por planta de los ciclos de selección de Zacatecas 58.....	66
3.7	Regresión lineal simple del contenido de prolina sobre rendimiento por planta de los ciclos de selección de Cafime.....	66

ÍNDICE DE CUADROS DEL APÉNDICE

Cuadro		Pág.
1A	Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de Zacatecas 58 y testigos en condiciones de riego, en campo CP-2010.....	86
2A	Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de Zacatecas 58 y testigos en condiciones de sequía, en campo CP-2010.....	87
3A	Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de Zacatecas 58 y testigos en condiciones de Temporal, en campo CP-2010.....	88
4A	Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de Cafime y testigos en condiciones de riego, en campo CP-2010.....	89
5A	Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de Cafime y testigos en condiciones de sequía, en campo CP-2010.....	90
6A	Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de Cafime y testigos en condiciones de temporal, en campo CP-2010.....	91
7A	Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de dos genotipos Zacatecas 58, Cafime y testigos en condiciones de riego, en campo CP-2010.....	92
8A	Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de dos genotipos Zacatecas 58, Cafime y testigos en condiciones de sequía, en campo CP-2010.....	93
9A	Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de dos genotipos Zacatecas 58, Cafime y testigos en condiciones	94

	de temporal, en campo CP-2010.....	
10A	Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de dos genotipos Zacatecas 58 y Cafime en condiciones de riego, en campo CP-2010.....	95
11A	Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de dos genotipos Zacatecas 58 y Cafime en condiciones de Sequía, en campo CP-2010.....	96
12A	Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de dos genotipos Zacatecas 58 y Cafime en condiciones de temporal, en campo CP-2010.....	97
13A	Promedios generales por ambiente de diecisiete caracteres de los ciclos de selección de Zacatecas 58 y testigos. CP 2010, Montecillo México	101
14A	Promedios generales por ambiente de diecisiete caracteres de los ciclos de selección de Cafime y testigos. CP 2010, Montecillo México.....	102

ÍNDICE DE FIGURAS DEL APÉNDICE

Figura		Pág.
1A	Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de zacatecas 58 en condiciones de riego.....	98
2A	Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de zacatecas 58 en condiciones de sequía.....	98
3A	Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de zacatecas 58 en condiciones de temporal.....	99
4A	Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de Cafime en condiciones de riego.....	99
5A	Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de Cafime en	100

	condiciones de sequía.....	
6A	Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de Cafime en condiciones de temporal	100
7A	Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de zacatecas 58 en condiciones de riego.....	103
8A	Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de zacatecas 58 en condiciones de sequía.....	103
9A	Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de zacatecas 58 en condiciones de temporal.....	104
10A	Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de Cafime en condiciones de riego.....	104
11A	Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de Cafime en condiciones de sequía.....	105
12A	Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de Cafime en condiciones de temporal.....	105

RENDIMIENTO Y CONTENIDO DE PROLINA EN MAÍZ SELECCIONADO PARA RESISTENCIA A SEQUÍA

Resumen general

El presente trabajo se realizó con el objetivo de estimar el avance genético promedio del rendimiento por ciclo de selección, de diferentes compuestos de selección masal visual estratificada (SMVE) practicada para resistencia a sequía en dos variedades de maíz (*Zea mays* L.), donde el rendimiento de grano fue el criterio de selección. También se tuvo como objetivos estimar el avance genético indirecto promedio del contenido de prolina (P) en las plantas de los diferentes ciclos de SMVE, y conocer si existe relación alguna entre el rendimiento y P, esto para poder determinar si el P en la planta puede recomendarse como un criterio de selección para resistencia a sequía en maíz. Para evaluar el rendimiento en campo, se usaron los siguientes materiales genéticos: ciclos de SMVE Z₀, Z₃, Z₆, Z₉, Z₁₂, Z₁₅, y Z₁₈ de la variedad Zacatecas 58; ciclos de SMVE C₀, C₃, C₆, C₉, C₁₂, y C₁₆ de Cafime; y los híbridos de temporal H-40 (comercial) y (T1 x T3) x T4 (H-trilineal experimental del Colegio de Postgraduados) como testigos. Los materiales fueron evaluados en tres ambientes: riego (R), sequía (S) y temporal (T) en Montecillo, Texcoco, Estado de México, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La parcela experimental consistió de dos surcos de 4 m de largo separados a 0.8 m. Cada surco tuvo 11 matas de dos plantas cada 40 cm, teniéndose 44 plantas por parcela. Se obtuvo el rendimiento en g de mazorca por planta (RPP) y se midieron componentes del rendimiento y caracteres agronómicos. Se analizaron los datos mediante un análisis de varianza, una comparación de medias, una correlación fenotípica, y un análisis de regresión simple del rendimiento sobre el número de ciclos de SMVE. Para medir el P en las plantas y estimar la relación entre P y RPP, se usaron los siguientes materiales genéticos: ciclos de SMVE Z₀, Z₅, Z₁₀, y Z₁₅ de Zacatecas 58; ciclos de SMVE C₀, C₅, C₁₀, y C₁₆ de Cafime; y los híbridos H-40 y H-trilineal como testigos. La evaluación también se hizo en Montecillo, bajo invernadero en las condiciones hídricas de R y S. En S se sembraron todos los genotipos, y en R únicamente los ciclos originales Z₀ y C₀, los ciclos avanzados Z₁₅ y C₁₆, y los testigos H-40 y H-trilineal. Por cada genotipo se tuvieron 10 macetas de plástico con 4.5 kg de suelo de textura franco. La siembra se hizo depositando 4 semillas por maceta y se aclaró a dos plantas por maceta, teniéndose 20

plantas de cada material. La siembra se hizo en suelo seco y después se aplicaron riegos diarios con manguera y pistola de riego, hasta que las plantas presentaron la tercera hoja ligulada. En esta fase fenológica, todas las macetas fueron llevadas a capacidad de campo (CC), y a partir de ahí se suspendió el riego a los tratamientos de S. El tratamiento de R consistió en mantener las macetas cerca de CC todo el tiempo. Cuando el tratamiento de S llegó a punto de marchitez permanente (PMP), se cosechó tejido de las plantas de R y S. De cada una de las 20 plantas de cada material, se cortó con tijeras 8 cm de largo de la tercera hoja ligulada; la muestra de tejido de cada planta se colocó en papel aluminio y se etiquetó para inmediatamente almacenarse en nitrógeno líquido. Posteriormente, las muestras se liofilizaron para evaluar el P por una determinación colorimétrica. Los datos de P se analizaron mediante una comparación gráfica primero, y luego se hicieron una comparación de promedios por ciclo de SMVE, un análisis de regresión lineal simple del P sobre el número de ciclos de SMVE, un análisis de regresión del P sobre el RPP de cada ciclo, y una correlación fenotípica entre el P y el RPP. Los resultados indicaron que en el ambiente de R los materiales tuvieron los valores más altos de RPP, seguido por S y T. Los compuestos de ciclos de SMVE más avanzados rindieron más que los originales e intermedios, pero no igualaron a los testigos, de los que el mejor fue el H-trilineal, cuya base genética es Cafime y Zacatecas 58. La respuesta genética observada para RPP fue diferente en cada variedad, y esto dependió de la diferente constitución genética entre ellas. Así, ésta resultó 7.4% en Zacatecas 58, y 2.6% en Cafime, indicando con ello que en ambas variedades la SMVE para resistencia a sequía fue efectiva, pues se logró incrementar significativamente el rendimiento en cada ciclo de selección. En ambas variedades, el RPP correlacionó principalmente con el índice de prolificidad y el ciclo vegetativo, obteniéndose por lo tanto plantas más prolíficas, más tardías y más robustas en general en los ciclos avanzados. Con respecto al P, se observó que en ambas variedades los compuestos de ciclos de SMVE más avanzados tuvieron en promedio mayor P en S que los compuestos originales e intermedios, y resultaron estadísticamente iguales a los testigos. Los ciclos originales y los ciclos más avanzados incrementaron hasta en 4.7 veces su P al pasar de una condición de R a una de S, mientras que el H-trilineal de base genética Cafime y Zacatecas 58 lo hizo hasta en 11 veces. La respuesta genética indirecta observada a la selección del P fue de 3.7% en Zacatecas 58 y 3.0% en Cafime, lo que indica que el seleccionar plantas resistentes o tolerantes a la sequía con base en su rendimiento, también

aumentó de manera indirecta significativamente su P. Se encontró que el P y el RPP tuvieron una clara relación lineal altamente significativa en Zacatecas 58 ($b_i = 0.024^{**}$, $R^2=0.98$), no así en Cafime ($b_i = 0.033$, $R^2=0.81$), que solo mostró cierta tendencia de relación tipo lineal. Además, el valor de la correlación entre RPP y P fue 0.994 y altamente significativo en Zacatecas 58, mientras que en Cafime fue 0.900, un valor alto, pero no significativo. Estos resultados demuestran que existió una relación lineal entre el RPP y el P; es decir, que conforme aumentó el rendimiento por efecto de la SMVE también aumentó indirectamente en la misma proporción el contenido promedio de prolina en las plantas de los compuestos de ciclos de selección más avanzados, lo que sugiere que el P puede considerarse como un criterio de selección en maíz para resistencia a sequía.

Palabras clave: *Zea mays* L., selección masal visual estratificada (SMVE), sequía, rendimiento, respuesta a la selección, prolina.

YIELD AND PROLINE CONTENT IN MAIZE SELECTED FOR DROUGHT RESISTANCE

Abstract

The objectives of this work were to estimate the average genetic gain for yield per selection cycle in different composites of stratified visual mass selection (SVMS) carried out for drought resistance in two maize (*Zea mays* L.) varieties, where the grain yield was the selection criterion; to estimate the indirect genetic gain for proline content (PC) in plants from the SVMS composites; and to know if there is a relationship between yield and PC in order to know whether PC qualifies as a selection criterion for drought resistance in maize. Yield was evaluated in the field for the following genotypes: SVMS composites Z₀, Z₃, Z₆, Z₉, Z₁₂, Z₁₅, Z₁₈ (Zacatecas 58 maize variety), C₀, C₃, C₆, C₉, C₁₂, and C₁₆ (Cafime variety), and the hybrids for rainfall conditions H-40 (commercial) and (T1 x T3) x T4 (an experimental one from the Colegio de Postgraduados, Mexico) as checks. The genotypes were evaluated in three environments: under irrigation (I), drought (D), and rainfall conditions (R) in Montecillo, Texcoco, Mexico, in a randomized complete block design with three replications.

Experimental units were two-row plots of 4 m in length with inter-row spacing of 0.8 m. and had 44 plants. Yield (Y) in kg of ears per plant was recorded along with yield components and agronomic traits. Data were analyzed using an analysis of variance followed by pairwise multiple comparisons of means, a phenotypic correlation, and a simple linear regression of Y on the number of cycles of SVMS. To quantify the PC in plants and estimate the relationship between Y and PC, SVMS composites Z₀, Z₅, Z₁₀, Z₁₅, C₀, C₅, C₁₀, and C₁₆, and the hybrids H-40 and (T1 x T3) x T4, used as checks, were planted also in Montecillo in a greenhouse in I and D conditions. All genotypes were planted in D, and only Z₀, Z₁₅, C₀, C₁₆, and the checks were planted in I. Each genotype was planted in plastic pots that had 4.5 kg of loam soil. Four seeds per pot were sown and thinned to two plants, so that 20 plants were kept in each genotype. Sowing was done in dry soil and then the pots were irrigated constantly with a hose and a spray gun until plants had the third ligulated leaf. At this phenological stage, all the pots were saturated with water to allow the soil reached field capacity (FC), and starting from that point no more irrigation was provided to the pots in D. In the I treatment all the pots were irrigated and kept near FC all the time. When the plants in D treatment reached the permanent wilting point, 8 cm of tissue from the third ligulated leaf of all plants was cut with scissors, wrapped in foil, labeled, kept in liquid nitrogen, and lyophilized to quantify the PC by a colorimetric determination. PC data were first analyzed using a graphic comparison and then by a comparison among the means of cycles of SVMS. It was also done two simple linear regression analyses, one of PC on the number of cycles of SVMS and the other of PC on the mean Y of each cycle. A phenotypic correlation was between Y and PC also calculated. Results showed that Y was greater in I, where no restrictions in humidity prevailed, than in D or R, and it was also greater in the advanced composites of SVMS, but these did not equate the Y of checks, from which the best was the experimental hybrid, formed with an inbred from Zacatecas 58 and two of Cafime. The observed genetic gain for Y was different in each variety, and this depended on the different genetic background between them. Thus, the genetic gain was 7.4% for Zacatecas 58 and 2.6% for Cafime. This meant that the SVMS for drought resistance was effective to significantly increase the yield every cycle of selection in both varieties. In both varieties, Y correlated mainly with prolificity index and cycle length, which meant that the plants of the last cycles of selection were more prolific, late, and robust in general than those of the original variety. With respect to PC, results showed that the plants

from the advanced composites of SVMS in both varieties had more PC in D and equate the PC value of the checks. The original and advanced cycles increased their PC up to 4.7 times when compared in I and D, and the experimental hybrid did increase its PC up to 11 times. Indirect genetic response for PC was 3.7% for Zacatecas 58 and 3.0% for Cafime, which meant that selection of resistant plants to drought based on their yield did indirectly increase their PC significantly. It was also found a strong linear relationship between Y and PC in Zacatecas 58 ($b_i = 0.024^{**}$, $R^2=0.98$) and a weak one in Cafime ($b_i = 0.033$, $R^2=0.81$). Moreover, the phenotypic correlation between Y and PC was 0.994** in Zacatecas 58 and 0.900 in Cafime. These results provided evidence that there was a linear relationship between Y and PC. That is to say that as yield increased by means of selection, PC in the plants was also increasing at the same proportion and direction. It can be concluded that SVMS did increase directly Y and indirectly PC. Therefore, PC can be proposed as a selection criterion for drought resistance in maize.

Keywords: *Zea mays* L., drought, proline, response to selection, stratified visual mass selection (SVMS), yield

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

El maíz (*Zea mays* L.) es el cereal más importante en el mundo por su producción y superficie sembrada (FAO, 2010). Es, además, un cultivo económicamente muy importante como alimento, forraje, fibra, y combustible; y es usado como ingrediente en una infinidad de productos manufacturados que inciden en la nutrición de la población mundial (Hallauer *et al.*, 2010).

En México, el maíz es el cultivo más importante desde el punto de vista alimentario, político, social y cultural. Con él se siembran anualmente casi 8.0 millones de hectáreas que producen alrededor de 20.1 millones de toneladas, y más de tres millones de productores y sus familias dependen de él (SIAP, 2009).

En nuestro país, típicamente existen dos tipos o grupos de productores de maíz: el primer grupo (92%) corresponde a los que poseen predios entre 0.1 y 5 ha, cuyos rendimientos promedio fluctúan entre 1.3 y 1.8 t ha⁻¹. El segundo grupo comprende al restante 8% de los productores; éstos tienen predios mayores de 5 ha, y sus rendimientos promedio oscilan de 1.8 a 12 t ha⁻¹ o más (de la Rosa *et al.*, 2006).

El maíz se produce en México en dos ciclos de cultivo: primavera-verano y otoño-invierno, bajo las más diversas condiciones agroclimáticas, geográficas y de humedad.

Por lo que se refiere a la modalidad hídrica, alrededor del 85% de la superficie cultivada con maíz se siembra en condiciones de temporal, proporción que representa aproximadamente 6.8 millones de hectáreas; mientras que el restante 15% de la superficie se siembra bajo condiciones de riego, representando poco más de un millón de hectáreas (SIAP-SAGARPA 2009).

Del total de la superficie sembrada con maíz, anualmente se reportan en promedio 1.5 millones de hectáreas siniestradas (SIAP, 2009), principalmente en temporal, lo que representa

el 19.4% de la superficie sembrada con dicho cultivo, siendo la sequía una de las causas primordiales.

El mejoramiento poblacional permite generar variedades mejoradas de polinización libre, las cuales son convenientes para agricultores que no cuentan con los recursos para adquirir semilla híbrida (Hallauer *et al.*, 2010), ya que los individuos seleccionados poseen genes superiores, que al recombinarse al azar producen nuevos genotipos más productivos. El incremento que se logre en cada ciclo de selección estará en función de la variabilidad genética de la población bajo mejoramiento y de la heredabilidad del carácter (Falconer, 1996).

La planta del maíz, como todas las plantas, evoluciona y se adapta sola por selección natural, pero lentamente. Con la intervención del hombre, la evolución de las especies cultivadas se puede acelerar (Reyes, 1990), fue así como la selección del maíz efectuada por el hombre a través de varios siglos, y aun milenios, en ambientes diversos, dio lugar a una amplia variabilidad genética de esta especie (García *et al.*, 2002).

La mayoría de las veces, el potencial productivo de las plantas cultivadas se ve seriamente afectado por las condiciones ambientales adversas que se presentan durante su ciclo de cultivo. Por lo tanto, es necesario incorporarles fuentes genéticas de resistencia que amortigüen los efectos de los factores ambientales adversos.

La obtención de variedades resistentes o tolerantes a condiciones climáticas extremas o adversas, ha permitido incrementar la producción bajo tales condiciones y, a la vez, ha permitido extender el cultivo de algunas especies a regiones en las que éste no era posible o era antieconómico.

A fin de incrementar la producción del maíz bajo condiciones adversas, tales como la sequía, exceso de humedad, calor, frío, salinidad o alcalinidad del suelo (exceso de sales solubles), deficiencia o exceso de minerales, mal drenaje, etc., es necesario formar variedades

cuyo aumento de producción se deba a su capacidad genética para resistir o tolerar dichas condiciones.

La resistencia o tolerancia a determinado factor ambiental adverso se puede encontrar en las poblaciones criollas o nativas, debido a que éstas, en la mayoría de los casos, están formadas por mezclas de variedades de diferente adaptación ecológica, por lo que tienen una mayor diversidad genética. De ellas, a través de la selección, pueden obtenerse plantas resistentes a factores ambientales adversos. Estas plantas pueden transmitir su adaptación ecológica a través de su recombinación con otras plantas a las que se desee incorporar la resistencia y características agronómicas idóneas, para la formación de nuevas variedades de mayor producción con resistencia o tolerancia a determinada condición ecológica. De lo anterior, se infiere que el mejor método para incorporar fuentes de resistencia contra factores adversos, es aprovechar el potencial genético de las poblaciones prometedoras, mediante la selección recurrente de individuos o familias superiores, para desarrollar variedades resistentes o tolerantes a tales factores.

La selección masal es el método más antiguo y simple utilizado para el mejoramiento genético del maíz (Hallauer *et al.*, 2010), pues el procedimiento es fácil, rápido y económico (Fehr, 1993). Este método de mejoramiento se consideraba ineficiente para mejorar caracteres de baja heredabilidad, como rendimiento de grano en maíz, debido a la gran variación fenotípica entre unidades de selección (fenotipos individuales), y su uso quedó restringido a caracteres de alta heredabilidad (por ejemplo adaptación, prolificidad, etc.) (Fehr, 1993; Sprague, 1955; Moll y Stuber, 1974).

La selección masal es un procedimiento de selección recurrente que permite concentrar genes favorables para un carácter de interés. En el caso del maíz, se siembra una población de plantas, se escogen los mejores individuos, se mezcla la semilla proveniente de ellos, se siembra la mezcla de semillas, y de su descendencia se escogen nuevamente los mejores individuos; el proceso se repite el número de veces que se desee (Ángeles, 1961). Esta metodología mostró buenos avances desde que Gardner (1961) propuso la estratificación del lote de selección para reducir la varianza fenotípica de caracteres de baja heredabilidad, la

siembra equidistante entre plantas y la cosecha sólo de plantas con competencia completa; sin embargo, la aplicación de dicha técnica es muy laboriosa en la práctica. Por tal motivo, Molina (1983) propuso una modificación que consiste en hacer la selección de manera visual manteniendo los dos principios básicos: (1) la estratificación del lote de selección y (2) la cosecha de plantas con competencia completa, a la cual denominó selección masal visual estratificada (SMVE).

Selección en mejoramiento genético es el hecho de cambiar direccionalmente la media genotípica de una población, de una generación a la siguiente (Molina, 1992). La selección puede actuar mediante diversos mecanismos en las poblaciones: variando las frecuencias génicas, las combinaciones de genes o el conjunto de combinaciones de genes preexistentes en la población; así mismo el resultado de la selección puede generar tres respuestas perceptibles fenotípicamente: cambio en las proporciones de genotipos preexistentes, acompañado de una desviación de la media poblacional; también puede ocasionar aparición de nuevos genotipos y, por último, cambios en la variabilidad de la población (Allard, 1975).

El cambio más importante producido por la selección es el que ocurre direccionalmente en la media genotípica de la población, el cual se denomina avance genético o respuesta a la selección (R) (Molina, 1992). Esta respuesta se define como la diferencia entre el valor fenotípico medio de la progenie y el de la generación progenitora. El avance genético es la diferencia entre la media de los progenitores seleccionados y la media de la población original ($S = X_s - X_0$), la cual es denominada diferencial de selección (S) (Falconer, 1996; Molina, 1992).

La respuesta a la selección depende de la heredabilidad (h^2) del carácter y de la intensidad de selección aplicada, medida dada por el diferencial de selección estandarizado. La magnitud del diferencial de selección depende de la proporción de la población incluida en el grupo seleccionado y de la desviación estándar fenotípica del carácter (Falconer, 1996).

Cuando la selección se aplica sin conocer los parámetros genéticos de la población, la respuesta promedio por ciclo de selección la estima la pendiente de la línea de regresión, o

coeficiente de regresión lineal simple del valor de la expresión del carácter bajo mejoramiento, sobre el número de ciclos de selección (Falconer, 1996; Molina, 1992). Para ello es necesario evaluar a través de ambientes y repeticiones, los compuestos de selección generados, incluida la población original.

El poder estimar la respuesta a la selección para una población en un ambiente o serie de ambientes, y conocer su potencial genético para usarse en mejoramiento ha sido una de las más importantes contribuciones de la genética cuantitativa al mejoramiento genético de las plantas y animales. Otra aplicación importante de la respuesta a la selección está relacionada con la comparación de los diferentes métodos de mejoramiento por selección (Hallauer, *et al.*, 2010).

Con respecto al efecto de la sequía en las plantas, el déficit hídrico provoca una serie de respuestas morfológicas, fisiológicas y fenológicas, las cuales pueden tener algún valor adaptativo, y por lo tanto conferir un cierto grado de tolerancia a esta condición de estrés (Dreesmann *et al.*, 1994; Attipalli *et al.*, 2004). En maíz, la sequía reduce el rendimiento de grano como consecuencia del menor número de granos por mazorca y peso del mismo (Stone *et al.*, 2001).

En los tejidos de las plantas se genera una acumulación de solutos durante el estrés hídrico como respuesta de sobrevivencia (Attipalli *et al.*, 2004). Uno de los principales solutos registrados durante el estrés por sequía es la prolina, cuya función ha sido asociada a sostener la turgencia de los tejidos para mantener la función celular (Ramanjulu y Sudhakar, 2000).

En México, el mejoramiento genético en maíz para resistencia a sequía se ha enfocado a la selección para rendimiento de grano de las plantas tolerantes o resistentes a la falta de humedad, siendo uno de los métodos usados para este fin la selección masal visual estratificada (SMVE) (Molina 1980), bajo el supuesto que mediante esta metodología en condiciones de humedad restringida del suelo se puede incrementar la resistencia a sequía en poblaciones de maíz.

Hernández y Muñoz (1988) mencionan que el rendimiento de grano, por ser un carácter de herencia compleja (poligénica), es afectado en gran medida por el ambiente, y que existe una pronunciada asociación del rendimiento con respecto al número de mazorcas por planta, tanto en condiciones de riego como de sequía.

Con respecto a los componentes del rendimiento, el número de granos es el principal componente, ya que el peso del grano ha mostrado ser un componente poco afectado por el ambiente (Andrade *et al.*, 1996; Borrás y Otegui, 2001).

En un estudio con maíz tropical para resistencia a sequía, Rincón (2008) encontró que los materiales evaluados presentaron cambios positivos en características agronómicas como rendimiento de grano, periodo de llenado de grano y asincronía floral. Menciona que la selección mejoró la eficiencia de la planta para acumular biomasa en el grano, sin modificar el peso de la biomasa aérea total. Concluyó que el incremento en el rendimiento de grano fue resultado del aumento del peso de grano en una de las poblaciones y del aumento del número de granos por mazorca en la otra.

Martínez-Zambrano *et al.* (2000) estimaron la respuesta a la selección en maíz y encontraron que la ganancia genética de mayor magnitud se obtuvo, en general, cuando la selección se efectuó en el ambiente más desfavorable (sequía), independientemente del ambiente de evaluación. Con base en los resultados para rendimiento, concluyeron que el mejor ambiente de selección fue el de sequía, y el mejor ambiente de evaluación fue el de riego.

1.1. Objetivos.

El objetivo general del presente trabajo fue estimar el avance genético promedio del rendimiento por ciclo de selección, de diferentes compuestos de selección masal visual estratificada de dos variedades de maíz seleccionadas para resistencia a sequía con base en el rendimiento de grano.

Como objetivos particulares se tuvieron: a) evaluar el avance genético indirecto del contenido de prolina en diferentes ciclos de selección masal de dos variedades de maíz y su relación con el rendimiento de grano; y b) determinar si el contenido de prolina en las plantas puede ser un criterio de selección para resistencia a sequía en maíz.

1.2. Hipótesis

La selección masal visual estratificada que se hizo para resistencia a sequía, con base en el rendimiento de grano, en las variedades de maíz Zacatecas 58 y Cafime ha sido efectiva, y por lo tanto ha logrado incrementar el rendimiento y la resistencia a sequía en los ciclos de selección avanzados de ambas poblaciones.

La selección masal visual estratificada que se hizo para resistencia a sequía, con base en el rendimiento de grano ha incrementado indirectamente la frecuencia de genes que producen un mayor contenido de prolina en las plantas de los últimos ciclos de selección en ambas poblaciones como una respuesta al estrés hídrico, por lo que el contenido de prolina en las plantas puede ser un criterio de selección para resistencia a sequía en maíz.

CAPÍTULO II. RENDIMIENTO Y RESPUESTA A LA SELECCIÓN MASAL PARA RESISTENCIA A SEQUÍA EN MAÍZ.

2.1 Resumen

El presente trabajo se realizó con el objetivo de estimar el avance genético promedio del rendimiento por ciclo de selección, de diferentes compuestos de selección masal visual estratificada (SMVE) practicada para resistencia a sequía en dos variedades de maíz (*Zea mays* L.), donde el rendimiento de grano fue el criterio de selección. Para evaluar el rendimiento en campo, se usaron los siguientes materiales genéticos: ciclos de SMVE Z₀, Z₃, Z₆, Z₉, Z₁₂, Z₁₅, y Z₁₈ de la variedad Zacatecas 58; ciclos de SMVE C₀, C₃, C₆, C₉, C₁₂, y C₁₆ de Cafime; y los híbridos de temporal H-40 (comercial) y (T1 x T3) x T4 (H-trilineal experimental del Colegio de Postgraduados) como testigos. Los materiales fueron evaluados en tres ambientes: riego (R), sequía (S) y temporal (T) en Montecillo, Texcoco, Estado de México, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La parcela experimental consistió de dos surcos de 4 m de largo separados a 0.8 m. Cada surco tuvo 11 matas de dos plantas cada 40 cm, teniéndose 44 plantas por parcela. Se obtuvo el rendimiento en kg de mazorca por planta (RPP) y se midieron componentes del rendimiento y caracteres agronómicos. Se analizaron los datos mediante un análisis de varianza, una comparación de medias, una correlación fenotípica, y un análisis de regresión simple del rendimiento sobre el número de ciclos de SMVE. Los resultados indicaron que en el ambiente de R, sin restricciones de humedad, los materiales tuvieron los valores más altos de RPP, seguido por S y T. Los compuestos de ciclos de SMVE más avanzados rindieron más que los originales e intermedios, pero no igualaron a los testigos, de los que el mejor fue el H-trilineal, cuya base genética es Cafime y Zacatecas 58. La respuesta genética observada para RPP fue diferente en cada variedad, y esto dependió de la diferente constitución genética entre ellas. Así, ésta resultó 7.4% en Zacatecas 58 y 2.6% en Cafime, indicando con ello que en ambas variedades la SMVE para resistencia a sequía fue efectiva, pues se logró incrementar significativamente el rendimiento en cada ciclo de selección. En ambas variedades, el RPP correlacionó principalmente con el índice de prolificidad y el ciclo vegetativo, obteniéndose

por lo tanto plantas más prolíficas, más tardías y más robustas en general en los ciclos avanzados.

Palabras clave: *Zea mays* L., selección masal visual estratificada (SMVE), sequía, rendimiento, respuesta a la selección.

CHAPTER II. YIELD AND RESPONSE TO MASS SELECTION FOR DROUGHT RESISTANCE IN MAIZE

2.2 Abstract

The objective of this work was to estimate the average genetic gain for yield per selection cycle in different composites of stratified visual mass selection (SVMS) carried out for drought resistance in two maize (*Zea mays* L.) varieties, where the grain yield was the selection criterion. Yield was evaluated in the field for the following genotypes: SVMS composites Z₀, Z₃, Z₆, Z₉, Z₁₂, Z₁₅, Z₁₈ (Zacatecas 58 maize variety), C₀, C₃, C₆, C₉, C₁₂, and C₁₆ (Cafime variety), and the hybrids for rainfall conditions H-40 (commercial) and (T1 x T3) x T4 (an experimental one from the Colegio de Postgraduados, Mexico) as checks. The genotypes were evaluated in three environments: under irrigation (I), drought (D), and rainfall conditions (R) in Montecillo, Texcoco, Mexico, in a randomized complete block design with three replications. Experimental units were two-row plots of 4 m in length with inter-row spacing of 0.8 m. and had 44 plants. Yield (Y) in kg of ears per plant was recorded along with yield components and agronomic traits. Data were analyzed using an analysis of variance followed by pairwise multiple comparisons of means, a phenotypic correlation, and a simple linear regression of Y on the number of cycles of SVMS. Results showed that Y was greater in I, where no restrictions in humidity prevailed, than in D or R, and it was also greater in the advanced composites of SVMS, but these did not equate the Y of checks, from which the best was the experimental hybrid, formed with an inbred from Zacatecas 58 and two of Cafime. The observed genetic gain for Y was different in each variety, and this depended on the different genetic background between them. Thus, the genetic gain was 7.4% for Zacatecas 58 and 2.6% for Cafime. This meant that the SVMS for drought resistance was effective to

significantly increase the yield every cycle of selection in both varieties. In both varieties, Y correlated mainly with prolificity index and cycle length, which meant that the plants of the last cycles of selection were more prolific, late, and robust in general than those of the original variety.

Keywords: *Zea mays* L., drought, response to selection, stratified visual mass selection (SVMS), yield

2.3 Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo más importante en México por varias razones: es la base de la dieta de la mayoría de la población; se producen alrededor de 20.1 millones de toneladas en una superficie de 8.0 millones de hectáreas; y más de tres millones de productores y sus familias dependen de él (SIAP, 2009). Del total de la superficie sembrada, el 85% es bajo condiciones de temporal, por lo que la irregularidad de las lluvias ocasiona mermas en el rendimiento y también superficies sembradas siniestradas (González *et al.*, 1994).

En maíz, las deficiencias hídricas pueden inducir disminuciones del rendimiento en más de 50%, dependiendo de la duración, intensidad y la etapa fenológica en la que se presente, sobre todo si el estrés hídrico ocurre durante la floración y el llenado de grano (Eyherabide *et al.*, 1996; Cakir, 2004; Bruce *et al.*, 2002).

Aun con los bajos rendimientos que tiene el cultivo de maíz en temporal, éste es muy importante, pues la mayoría de las veces representa un cultivo de subsistencia ya que forma principalmente la fuente de su alimentación para los productores y sus familias que a demás obtienen forraje para sus animales, o para vender algo del producto, pero lo más importante es que los mantiene ocupados en una labor donde la esperanza es cosechar algo de grano (Montañez y Warman, 1985; Luna y Zárate, 1994).

Una alternativa para que la disminución del rendimiento de grano no sea significativa, es el uso de variedades tolerantes a la sequía (Raya *et al.*, 1996). Por ello es necesario mejorar las poblaciones con tolerancia o resistencia *per se* a la sequía para hacerlas más productivas y para que sirvan como fuentes genéticas de resistencia para otras variedades que no amortiguan bien los efectos de los factores ambientales adversos, pero que tienen otros atributos.

El mejoramiento poblacional mediante selección masal permite generar variedades mejoradas de polinización libre, las cuales son convenientes para agricultores que no cuentan con los recursos para adquirir semilla híbrida (Hallauer *et al.*, 2010), ya que los individuos seleccionados poseen genes superiores, que al recombinarse al azar producen nuevos genotipos más productivos. El incremento que se logre en cada ciclo de selección estará en función de la variabilidad genética de la población bajo mejoramiento y de la heredabilidad del carácter (Falconer and Mackay, 1996, Chávez 1995).

Con respecto al mejoramiento poblacional en maíz para resistencia a sequía, Molina (1980), menciona que la selección masal es efectiva para mejorar la resistencia genética a sequía cuando se usa el rendimiento de grano como criterio de selección. Este autor estimó el avance genético por ciclo de selección en las variedades Zacatecas 58 (seis ciclos) y Cafime (con cinco ciclos de selección), evaluadas en sequía y temporal, y encontró un avance promedio por ciclo de 2.2 a 14.5% en sequía y de 1.6 a 11.2% en temporal para Zacatecas 58; en la variedad Cafime el avance genético varió de 0.6 a 8.0% en sequía, y de 0.6 a 25.3% en temporal. El rendimiento promedio por planta resultó ser mayor en sequía que en temporal, debido a que el ciclo vegetativo es mayor en siembras de primavera (sequía) que en las siembras de verano (temporal).

Por su parte, Vargas *et al.* (1982) al evaluar los cambios producidos por diez ciclos de selección masal visual estratificada para rendimiento, encontraron que las medias de los caracteres agronómicos y componentes del rendimiento evaluados aumentaron por efecto de la selección. También encontraron que el rendimiento correlacionó significativamente con altura de planta, número de granos por mazorca, y longitud de mazorca. En cuanto al avance obtenido por ciclo de selección para rendimiento, éste fue de 3.75% en promedio de dos

ambientes. En una evaluación similar, De León y Coors (2002) encontraron que la longitud de mazorca y el peso de ésta se redujeron a través de 24 ciclos de selección masal, y que tal reducción se compensó al incrementarse el índice de prolificidad.

En otro trabajo, Ortiz *et al.* (1984), estudiaron los cambios en las características morfológicas y fisiotécnicas de maíz por efecto de la selección para rendimiento de grano. Encontraron que la altura de planta y de mazorca se incrementó significativamente en relación con la de la población original. Concluyeron que el incremento en el rendimiento biológico estuvo relacionado con incrementos en el área foliar, la altura de planta y la altura de la mazorca.

En relación con la respuesta de las plantas de maíz al estrés hídrico, Avendaño *et al.* (2008) encontraron que las variedades mejoradas por selección masal para resistencia a sequía mostraron mayor capacidad de recuperación que las no mejoradas una vez que cesó el estrés hídrico. Observaron que la sequía retrasó la floración masculina y femenina, y que el detenimiento del crecimiento vegetativo por efecto del estrés hídrico en las variedades mejoradas y su rápida recuperación, una vez cesado el estrés, fue un indicador de que dichas variedades, durante el proceso de selección han desarrollado mecanismos de resistencia que les permiten sobrevivir en condiciones de baja humedad. Se observó también que en el ambiente de sequía se obtuvieron los avances genéticos para rendimiento más altos por ciclo para las variedades Zacatecas 58 y Cafime, pero la mayor ganancia acumulada se encontró en condiciones de riego (Avendaño *et al.*, 2009).

El presente trabajo tuvo como objetivos: a) estimar el avance genético promedio por ciclo de selección, de diferentes compuestos de selección masal visual estratificada de dos variedades de maíz seleccionadas para resistencia a sequía con base en el rendimiento de grano, y b) estudiar los cambios ocurridos en características agronómicas y componentes del rendimiento por efecto de la selección masal en cada variedad. Se tuvo como hipótesis: a) que la selección masal visual estratificada para resistencia a sequía en las variedades de maíz Zacatecas 58 y Cafime ha sido efectiva, y por lo tanto ha logrado incrementar el rendimiento de grano en ambas poblaciones, y b) las plantas de los compuestos de ciclos de selección más

avanzados presentan cambios significativos en características agronómicas y componentes del rendimiento comparadas con aquéllas de la variedad original.

2.4 Materiales y métodos

La evaluación de los materiales genéticos se llevó a cabo en el Campo Agrícola Experimental del Colegio de Postgraduados (CP), Campus Montecillo, Estado de México, ubicado en Montecillo, Texcoco, a 19° 28' 00'' N y 98° 54' 13'' O y a una altitud de 2250 msnm. El clima es de tipo Cb (wo) (w) (i') g, correspondiente a templado con verano fresco largo, temperatura media anual entre 12 y 18 °C. El mes más frío oscila entre -3 y 18 °C, y el mes más cálido entre 6.5 y 22 °C. La precipitación media anual es de 637 mm (García, 1988).

El material genético evaluado comprendió diversos ciclos de selección de las variedades de maíz de polinización libre Zacatecas 58 y Cafime, más dos testigos. Zacatecas 58 es la colección 58 del estado de Zacatecas, procedente del municipio de Saint Alto y pertenece a la raza Cónico Norteño (Wellhausen *et al.*, 1951). Es una variedad precoz en Chapingo; en siembras de verano la floración media es de 59 d y la madurez fisiológica de aproximadamente 98 d. Tiene un rango amplio de adaptación. (Molina 2011, Com. Pers). Cafime: pertenece a la raza Bolita (Wellhausen *et al.*, 1951) y como tal procede de las regiones secas de Oaxaca. Esta variedad fue liberada en 1958, y es el resultado de seleccionar visualmente y mezclar siete cruas resistentes a sequía derivadas de la raza Bolita, de una prueba hecha en 1957 en el Campo Experimental Francisco I. Madero, ubicado en Durango. Esta variedad es reconocida como la más tolerante y adaptada a las condiciones de sequía en siembras temporaleras de Durango. Tiene un ciclo vegetativo de 112 d, con 66 d a antesis (Medina y Gutiérrez, 2008). Los testigos fueron el H-40, que es un híbrido temporalero comercial del INIFAP, y el híbrido trilineal experimental (T₁ x T₃) x T₄ del Colegio de Postgraduados (H-trilineal) de base genética Cafime seleccionado por Molina (Com. Pers).

En el experimento se evaluaron las variedades de maíz Zacatecas 58 original (Z₀) y Cafime original (C₀) y algunos ciclos avanzados de cada una de ellas: Z₃, Z₆, Z₉, Z₁₂, Z₁₅ y Z₁₈ de Zacatecas 58; y C₃, C₆, C₉, C₁₂ y C₁₆ de Cafime. Los compuestos de ciclos de selección de

ambas variedades fueron obtenidos bajo el método de selección masal visual estratificada (SMVE) en suelos con muy baja humedad (Molina 1983). Los materiales genéticos se evaluaron en tres ambientes: riego (R), sequía (S) y temporal (T), bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones por ambiente. Los experimentos de riego y de sequía se sembraron el 19 de Mayo del 2010 en suelo seco y se dio un riego de germinación.

En el experimento de riego (R) se aplicaron los riegos de auxilio necesarios para que no faltara humedad en el cultivo durante todo el ciclo. En el de sequía (S) sólo se aplicó un riego de auxilio 5 d después de la siembra para facilitar la emergencia, y posteriormente no se aplicaron riegos, y el cultivo quedó expuesto a la falta de agua hasta el establecimiento del temporal. Por otro lado, el experimento de temporal se sembró el 26 de Junio del 2010, una vez que se establecieron las lluvias.

Todos los experimentos estuvieron expuestos a la lluvia de temporal una vez que éste se estableció.

Los caracteres estudiados fueron los siguientes:

a) Rendimiento y sus caracteres componentes.

Al momento de la cosecha, en cada parcela se tomó el peso total de mazorcas por parcela en g y también se contó el número de plantas, para determinar el rendimiento por planta en g (RPP). Posteriormente se midieron los componentes del rendimiento en una muestra de diez mazorcas tomadas al azar de cada parcela:

Longitud de mazorca (LM). Promedio de la medida en cm desde la base de la mazorca hasta el ápice del olote.

Diámetro de la mazorca (DM). Promedio de la medida en cm de la parte media de la mazorca.

Número de hileras por mazorca (NHM). Promedio del número de hileras por mazorca, contadas en la parte media de ésta.

Número de granos por hilera (NGH). Promedio del número de semillas por hilera.

Peso de 100 semillas (PS). Peso promedio en g de 100 semillas tomadas de la parte media de la mazorca.

Índice de Prolificidad (IP). Número total de mazorcas por parcela dividido entre el número total de plantas en la parcela.

b) Caracteres agronómicos.

Días a floración masculina (DFM). Tomado como el promedio del número de días transcurridos desde el primer riego de germinación (en R y S), o desde la siembra (en T), hasta cuando el 50% de las plantas en la parcela presentaban dehiscencia de las anteras.

Altura de planta (AP). Fue el promedio de diez plantas por parcela, y se midió en cm, desde la base del tallo hasta la base de la espiga.

Altura de la mazorca (AM). Promedio de diez plantas por parcela. Se midió en cm desde la base del tallo hasta la base de la mazorca principal.

Número de Hojas Totales (NHT), hojas abajo de la mazorca (HAM), hojas arriba de la mazorca (HARM), longitud de la hoja de la mazorca en cm (LHM), ancho de la hoja de la mazorca en cm (AHM), número de ramas por espiga (NRE), longitud de la rama primaria de la espiga en cm (LRE), todas tomadas como el promedio de diez plantas por parcela para cada variable.

Análisis de la información

- a) Análisis de varianza y comparación de medias. Para cada variedad y carácter se efectuó el análisis de varianza por ambiente y combinado de ambientes, de acuerdo con la estructura que se presenta en los Cuadros 2.1 y 2.2, respectivamente. Para realizar los análisis de varianza de todas las fuentes de variación se usó el procedimiento PROC ANOVA de SAS (Versión 9.0, SAS Institute, 2002), excepto para comparar los promedios de los ciclos de selección de variedades con los promedios de los testigos, donde se usó el modelo lineal general (GLM) y el procedimiento CONTRAST. La comparación entre medias de los caracteres en cada variedad, se realizó con la Prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad, partiendo del análisis combinado de ambientes.
- b) Correlación fenotípica. Se hizo un análisis de correlación fenotípica para cada variedad y ambiente, y combinando ambientes en cada variedad. Se correlacionó el carácter RPP con los componentes del rendimiento y con los caracteres agronómicos. El análisis se hizo mediante el procedimiento PROC CORR de SAS.

Cuadro 2.1. Estructura del análisis de varianza por ambiente. CP-2010, Montecillo, México.

Fuente de Variación	g. l.	Zacatecas 58	Cafime
Repeticiones	(r -1)	2	2
Variedades	(v -1)	8	7
Ciclos de Selección	(c-1)	6	5
Testigos	(t-1)	1	1
Ciclos de Selección vs Testigos		1	1
Error	(r -1)(v-1)	16	14
Total	rv-1	26	23

Cuadro 2.2. Estructura del análisis de varianza combinado de ambientes. CP-2010, Montecillo, México.

Fuente de Variación	g.l.	Zacatecas 58	Cafime
Ambientes	(a-1)	2	2
Repeticiones/Ambientes	a(r-1)	6	6
Variedades	(v-1)	8	7
Ciclos de selección	(c-1)	6	5
Testigos	(t-1)	1	1
Ciclos de Selección vs Testigos		1	1
Variedades x Ambientes	(v-1)(a-1)	16	14
Error	a(v-1)(r-1)	48	42
Total	arv-1	80	63

- c) Respuesta genética a la selección. La respuesta genética a la selección para el carácter RPP (Y) se estimó mediante el coeficiente de regresión lineal simple (b_i) sobre el número de ciclos de selección (X). En este análisis no se incluyeron los testigos. Se analizaron los datos de las dos variedades originales: Z_0 y C_0 , y los de los ciclos avanzados: $Z_3, Z_6, Z_9, Z_{12}, Z_{15}$ y Z_{18} y C_3, C_6, C_9, C_{12} y C_{16} de las variedades Zacatecas 58 y Cafime, respectivamente. El análisis de regresión para cada variedad se hizo considerando el promedio de los datos de las tres repeticiones en los tres ambientes, mediante el procedimiento PROC REG de SAS.
- d) Respuesta observada a la selección. La respuesta observada o avance genético (ΔG) a la selección para el carácter RPP en ambas variedades se calculó como el coeficiente

de regresión (b_i) en porcentaje del valor fenotípico de la variedad original o ciclo cero, en la forma siguiente:

$$(\Delta G) = (b_i / C_0) \times 100$$

Donde:

ΔG = avance genético promedio por ciclo de selección

C_0 = Media del carácter en la variedad original

b_i = Coeficiente de regresión lineal simple

Multiplicando el ΔG promedio por ciclo de selección por el número de ciclos (18 para Zacatecas 58 ó 16 para Cafime), se obtuvo el ΔG total o acumulado en porcentaje con respecto a la variedad original.

2.5 Resultados

En los cuadrados medios del análisis de varianza individual de la variedad Zacatecas 58 incluyendo testigos, en los ambientes de riego, sequía y temporal, y de la variedad Cafime más los testigos. Para la variedad Zacatecas 58 se observa que hubo diferencias altamente significativas entre variedades para todos los caracteres en riego, sequía, y temporal, excepto LM y PS en este último (Cuadros 1A, 2A, y 3A del Apéndice). Entre ciclos de Zacatecas 58, y entre el promedio de ciclos y el promedio de testigos, hubo diferencias significativas y altamente significativas para la mayoría de los caracteres en los tres ambientes. En cuanto a Cafime, hubo diferencias significativas y altamente significativas entre variedades para todos los caracteres en el ambiente de riego, y también las hubo para la mayoría de caracteres en sequía y temporal (Cuadros 4A, 5A y 6A). Entre ciclos de Cafime hubo diferencias significativas y altamente significativas para la mayoría de los caracteres en los tres ambientes, mientras que entre el promedio de ciclos y el promedio de testigos, hubo diferencias significativas y altamente significativas para RPP y algunos de sus componentes, y para algunos caracteres agronómicos en los tres ambientes.

En los cuadrados medios del análisis de varianza por ambiente de todos los materiales genéticos evaluados (ciclos de Zacatecas 58 más ciclos de Cafime, y testigos), los resultados indican que hubo diferencias altamente significativas entre variedades (todos los materiales

genéticos), y entre genotipos (ciclos de Zacatecas y de Cafime) para todos los caracteres en riego, sequía, y temporal. Entre el promedio de los genotipos y el de los testigos hubo diferencias significativas y altamente significativas para la mayoría de los caracteres, incluido RPP (Cuadros 7A, 8A, y 9A).

En los cuadrados medios del análisis de varianza por ambiente únicamente de los ciclos de Zacatecas 58 más los de Cafime. Los resultados indican que entre el promedio de los ciclos de Zacatecas 58 y el de los ciclos de Cafime hubo diferencias significativas y altamente significativas para la mayoría de los caracteres en los tres ambientes, aunque en temporal la diferencia entre ambos promedios de RPP resultó no significativa (Cuadros 10A, 11A, y 12A).

El análisis de varianza combinado de los ciclos de la variedad Zacatecas 58 incluyendo los testigos (Cuadro 2.3), detectó diferencias altamente significativas entre ambientes para todos los caracteres, excepto AHM y NHM. Entre variedades hubo diferencias altamente significativas para todos los caracteres evaluados, e igualmente las hubo entre los ciclos de selección de Zacatecas 58. Con respecto a los testigos, se detectaron diferencias significativas y altamente significativas entre ellos en la mayoría de los caracteres. Por otro lado, hubo diferencias altamente significativas entre el promedio de los ciclos de Zacatecas 58 y el promedio de los testigos. La interacción global variedades x ambientes fue altamente significativa para RPP, IP, AP, AM, y NRE, y significativa para DM, LM, PS, DFM, HARM, y LRE. En los demás caracteres la interacción resultó no significativa.

Por otro lado, para los ciclos de la variedad Cafime y los testigos, el análisis de varianza combinado (Cuadro 2.4), detectó diferencias significativas y altamente significativas entre ambientes para todos los caracteres, excepto NHM, AHM y LRE. Entre variedades hubo diferencias altamente significativas para todos los caracteres estudiados, mientras que entre los ciclos de selección de Cafime DM fue el único carácter que no mostró diferencias significativas. Entre testigos se detectaron diferencias significativas y altamente significativas en la mayoría de los caracteres. Por otro lado, hubo diferencias altamente significativas entre el promedio de los ciclos de Cafime y el promedio de los testigos para la mayoría de los caracteres, exceptuando LHM, LRE, NRE, DM, LHM, y PS. La interacción global variedades

Cuadro 2.3. Cuadrados medios y coeficientes de variación del análisis de varianza combinado de tres ambientes de diecisiete caracteres de la evaluación de ciclos de Zacatecas 58 y testigos. CP-2010, Montecillo, México.

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Amb	2	62574.0**	71.40**	2.88**	0.5	165.0**	1251.5**	1.27**	129.2**
Reps/Amb	6	53.0	0.14	0.01	0.4	3.8	7.6	0.01	1.0
Var	8	11891.4**	10.27**	0.55**	7.0**	41.1**	29.7**	0.42**	525.7**
Zac	6	5545.0**	7.61**	0.22**	5.1**	40.3**	14.1**	0.35**	514.6**
Test	1	2271.3**	0.02	0.37*	7.0*	10.4	1.2	0.09**	0.0
Zac vs Test	1	59589.2**	36.51**	2.76**	17.7**	76.4**	151.6**	1.17**	1118.0**
Var x Amb	16	1830.0**	0.81*	0.05*	0.3	3.9	6.6*	0.05**	7.4*
Error	48	70.5	0.40	0.02	0.5	2.7	3.0	0.01	0.4
C.V.		8.6	5.30	3.98	5.2	6.3	7.1	10.84	0.9

Cuadro 2.3. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Amb	2	8887.2**	4112.4**	13.1**	1.51**	19.8**	1132.2**	0.6	19.2**	89.3**
Reps/Amb	6	80.4	14.3	0.3	0.08	0.5	11.8	0.3	2.3	1.5
Var	8	11439.6**	10906.3**	16.0**	1.92**	24.7**	541.4**	12.5**	119.5**	65.2**
Zac	6	10897.1**	10556.5**	12.4**	0.91**	18.7**	540.9**	3.5**	98.2**	34.7**
Test	1	3394.8**	3874.9**	4.0**	3.20**	0.1	5.4	4.5**	4.9	193.3**
Zac vs Test	1	22739.0**	20036.5**	49.6**	6.70**	85.1**	1080.4**	74.8**	361.4**	120.2**
Var x Amb	16	258.5**	98.7**	0.3	0.11*	0.4	10.9	0.3	4.4*	11.3**
Error	48	63.3	29.0	0.1	0.05	0.2	11.7	0.2	2.3	1.6
C.V.		3.6	4.5	6.3	5.41	4.7	4.4	5.7	4.0	11.6

FV= Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Amb= ambientes, Reps/Amb=repeticion entre ambientes, Var= variedades, Zac= ciclos de selección de Zacatecas 58, Test= testigos, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP= rendimiento por planta (g), LM= longitud de la mazorca (cm), DM= diámetro de la mazorca (cm), NHM= número de hileras por mazorca, NGH= número granos por hilera, PS= peso de cien semillas (g), IP= índice de prolificidad, DFM= días a floración masculina, AP= altura de planta (cm), AM= altura de mazorca (cm), HAM= hojas abajo de la mazorca, HARM= hojas arriba de la mazorca, NHT= número de hojas totales, LHM= longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM= ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE= longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE= número de ramas por espiga.

Cuadro 2.4. Cuadrados medios y coeficientes de variación del análisis de varianza combinado de tres ambientes de diecisiete caracteres de la evaluación de ciclos de Cafime y testigos. CP-2010, Montecillo, México.

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Amb	2	90278.1**	70.0**	3.58**	0.1	137.9**	1821.8**	1.06*	138.0**
Reps/Amb	6	35.1	0.3	0.03	0.2	7.6	5.7	0.01	0.4
Var	7	5508.2**	4.6**	0.13**	10.3**	27.9**	49.2**	0.28**	139.5**
Caf	5	1552.0**	6.1**	0.07	6.0**	29.0**	63.9**	0.17**	162.2**
Test	1	2271.3**	0.0	0.37*	7.0*	10.4	1.2	0.10**	0.0
Caf vs Test	1	28527.0**	1.7	0.16	35.5**	39.6**	23.6	1.00**	165.3**
Var x Amb	16	1096.8**	0.5	0.06	0.4	4.7**	11.7*	0.06**	6.7**
Error	42	31.6	0.4	0.03	0.4	1.7	4.7	0.01	0.2
C.V.		4.9	4.8	4.36	4.9	4.9	7.7	8.50	0.7

Cuadro 2.4. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Amb	2	8661.2**	5090.3**	15.26**	1.90**	24.90**	1570.1**	0.5	5.1	277.9**
Reps/Amb	6	103.4	145.1	0.04	0.12	0.02	5.2	0.3	0.9	2.5
Var	7	3474.1**	3188.8**	5.58**	0.76**	6.63**	176.1**	6.2**	39.1**	70.0**
Caf	5	2932.0**	3032.4**	4.60**	0.18*	6.00**	244.7**	2.4**	49.4**	55.2**
Test	1	3394.8**	3874.9**	4.00**	3.20**	0.08	5.4	4.5**	4.9	193.3**
Caf vs Test	1	6264.0**	3284.5**	11.66**	1.21**	16.40**	4.2	27.0**	22.4	19.8
Var x Amb	16	186.8**	98.4	0.27	0.06	0.18	10.1	0.3	10.5**	8.1**
Error	42	61.1	128.1	0.20	0.05	0.21	8.3	0.2	3.4	1.5
C.V		3.3	8.3	6.41	5.28	4.00	3.3	5.9	4.5	8.6

FV= Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Amb= ambientes, Reps/Amb=repeticion entre ambientes, Var= variedades, Caf= ciclos de selección de Cafime, Test= testigos, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP= rendimiento por planta (g), LM= longitud de la mazorca (cm), DM= diámetro de la mazorca (cm), NHM= número de hileras por mazorca, NGH= número granos por hilera, PS= peso de cien semillas (g), IP= índice de prolificidad, DFM= días a floración masculina, AP= altura de planta (cm), AM= altura de mazorca (cm), HAM= hojas abajo de la mazorca, HARM= hojas arriba de la mazorca, NHT= número de hojas totales, LHM= longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM= ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE= longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE= número de ramas por espiga

por ambientes fue altamente significativa para RPP, GH, IP, DFM, AP, LRE y NRE, y significativa para PS. En los demás caracteres la interacción resultó no significativa.

El análisis de varianza combinado de los tres ambientes para el conjunto de variedades, que incluyó los ciclos de Zacatecas 58 más los ciclos de Cafime y los testigos (Cuadro 2.5), detectó diferencias altamente significativas entre ambientes, entre variedades y entre genotipos para todos los caracteres, mientras que entre los testigos solo la mitad de ellos tuvo significancia. Por otro lado, hubo diferencias altamente significativas entre el promedio del conjunto de ciclos de Zacatecas 58 y Cafime y el promedio de los testigos, para todos los caracteres, excepto NRE y PS. La interacción global variedades x ambientes fue altamente significativa para RPP, PS, IP, DFM, AP, LRE y NRE, y significativa para DM, LM y NGH. En los demás caracteres la interacción resultó no significativa.

El análisis de varianza combinado de los ciclos de la variedad Zacatecas 58 más los de Cafime, sin incluir testigos (Cuadro 2.6), detectó diferencias altamente significativas entre ambientes para todos los caracteres, excepto AHM, LRE y NHM. Entre variedades hubo diferencias altamente significativas para todos los caracteres evaluados. Entre los ciclos de Zacatecas 58 se detectaron diferencias altamente significativas para todos los caracteres, mientras que entre los ciclos de Cafime únicamente DM resultó no significativo. Por otro lado, hubo diferencias altamente significativas entre el promedio de los ciclos de Zacatecas 58 y el promedio de los ciclos de Cafime para la mayoría de los caracteres, excepto NGH e IP. La interacción variedades x ambientes fue altamente significativa para RPP, PS, IP, DFM, AP, LRE y NRE. En los demás caracteres la interacción resultó no significativa.

El coeficiente de variación (C.V.) resultó de magnitud aceptable (<20%) en todos los análisis de varianza individuales y combinados de todos los caracteres.

Cuadro 2.5. Cuadrados medios y coeficientes de variación del análisis de varianza combinado de tres ambientes de diecisiete caracteres de la evaluación de ciclos de Zacatecas 58, ciclos de Cafime, y testigos. CP-2010, Montecillo, México.

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Amb	2	116688.7**	124.8**	5.37**	0.2	275.5**	2576.7**	1.80**	273.2**
Reps/Amb	6	59.8	0.3	0.01	0.1	7.3	8.1	0.02	0.7
Var	14	7402.1**	9.9**	0.47**	7.4**	33.9**	74.7**	0.31**	386.0**
Geno	12	4319.1**	10.1**	0.41**	5.7**	33.2**	85.3**	0.25**	396.5**
Test	1	2271.3**	0.0	0.37*	6.9*	10.4	1.2	0.09**	0.0
Geno vs Test	1	49528.2**	16.7**	1.30**	28.6**	65.5**	21.0	1.23**	644.4**
Var x Amb	16	1359.0**	0.6*	0.05*	0.3	4.0*	12.4**	0.05**	5.5**
Error	84	56.0	0.4	0.03	0.5	2.4	4.1	0.01	0.4
C.V.		7.5	5.0	4.15	5.2	5.9	7.7	10.11	0.8

Cuadro 2.5. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Amb	2	15071.8**	7828.5**	24.2**	2.9**	38.0**	2351.0**	0.9*	10.0*	271.2**
Reps/Amb	6	88.4	54.0	0.1	0.1	0.2	5.0	0.3	1.4	2.1
Var	14	7806.5**	7757.6**	11.5**	1.3**	17.8**	523.3**	8.4**	102.3**	85.2**
Geno	12	7523.0**	7739.5**	10.4**	1.0**	16.4**	584.0**	4.7**	104.5**	82.0**
Test	1	3394.8**	3874.9**	4.0**	3.2**	0.1	5.4	4.5**	4.9	193.3**
Geno vs Test	1	15619.7**	11857.3**	32.5**	4.0**	52.6**	311.9*	56.2**	173.0**	16.1
Var x Amb	16	212.4**	103.2	0.2	0.1	0.3	12.7	0.3	8.2**	11.5**
Error	84	71.8	87.8	0.2	0.05	0.2	11.0	0.3	3.0	1.8
C.V.		3.8	7.5	6.7	5.6	4.6	4.0	6.3	4.4	10.8

FV= Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Amb= ambientes, Reps/Amb=repeticón dentro de ambientes, Var= variedades, Geno= ciclos de seleccón de Zacatecas 58 y Cafime, Test= testigos, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP= rendimiento por planta (g), LM= longitud de la mazorca (cm), DM= diámetro de la mazorca (cm), NHM= número de hileras por mazorca, NGH= número granos por hilera, PS= peso de cien semillas (g), IP= índice de prolificidad, DFM= días a floración masculina, AP= altura de planta (cm), AM= altura de mazorca (cm), HAM= hojas abajo de la mazorca, HARM= hojas arriba de la mazorca, NHT= número de hojas totales, LHM= longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM= ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE= longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE= número de ramas por espiga.

Cuadro 2.6. Cuadrados medios y coeficientes de variación del análisis de varianza combinado de tres ambientes de diecisiete caracteres de la evaluación de los ciclos de Zacatecas 58 y de los ciclos de Cafime. CP-2010, Montecillo, México.

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Amb	2	84271.0**	108.4**	4.34**	0.33	248.5**	2129.0**	1.27**	284.0**
Reps/Amb	6	55.4	0.3	0.01	0.05	6.6	7.2	0.01	0.5
Var	12	4319.1**	10.1**	0.41**	5.70**	33.2**	85.3**	0.25**	396.5**
Zac	6	5545.0**	7.6**	0.22**	5.16**	40.3**	14.1**	0.35**	514.6**
Caf	5	1552.0**	6.1**	0.07	6.00**	29.0**	64.0**	0.17**	162.2**
Zac vs Caf	1	10800.3**	45.7**	3.26**	7.10**	11.3	619.3**	0.01	859.3**
Var x Amb	16	999.1**	0.6	0.05	0.40	4.1	13.6**	0.05**	3.7**
Error	72	63.2	0.4	0.03	0.52	2.5	4.5	0.01	0.4
C.V.		8.7	5.2	4.17	5.25	6.0	8.1	10.76	0.9

Cuadro 2.6. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	HTM	LHM	AHM	LRE	NRE
Amb	2	12732.1**	6550.2**	20.3**	2.5**	31.8**	2039.0**	0.8	5.5	209.1**
Reps/Amb	6	95.2	61.5	0.2	0.06	0.2	6.7	0.5	1.8	2.5
Var	12	7523.0**	7739.5**	10.3**	0.9**	16.4**	584.0**	4.7**	104.5**	82.0**
Zac	6	10897.1**	10556.5**	12.4**	0.9**	18.7**	540.9**	3.5**	98.2**	34.7**
Caf	5	2932.0**	3032.4**	4.6**	0.1*	6.0**	244.7**	2.4**	49.4**	55.2**
Zac vs Caf	1	10234.1**	14372.6**	26.4**	4.4**	54.1**	2539.8**	23.4**	418.1**	499.1**
Var x Amb		203.0**	109.7	0.19	0.1	0.3	13.1	0.3	9.4**	11.9**
Error	72	81.1	101.4	0.2	0.06	0.2	11.7	0.3	3.0	2.0
C.V.		4.1	8.3	7.2	5.9	4.8	4.2	6.7	4.6	11.5

FV= Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Amb= ambientes, Reps/Amb=repetición entre ambientes, Var= variedades, Zac= ciclos de selección de Zacatecas 58, Caf= ciclos de selección de Cafime, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP= rendimiento por planta (g), LM= longitud de la mazorca (cm), DM= diámetro de la mazorca (cm), NHM= número de hileras por mazorca, NGH= número granos por hilera, PS= peso de cien semillas (g), IP= índice de prolificidad, DFM= días a floración masculina, AP= altura de planta (cm), AM= altura de mazorca (cm), HAM= hojas abajo de la mazorca, HARM= hojas arriba de la mazorca, NHT= número de hojas totales, LHM= longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM= ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE= longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE= número de ramas por espiga.

En los promedios generales por ambiente de los 17 caracteres de Zacatecas 58 y Cafime. Se observa que los valores fenotípicos promedio de RPP en ambas variedades tendieron a ser mayores en riego, y los valores menores se obtuvieron en temporal. Una tendencia similar se observó en los componentes del rendimiento, donde los valores de riego o sequía fueron mayores que los de temporal. Para los caracteres agronómicos, los valores en riego o sequía, en ambas variedades, tendieron a ser mayores que en temporal, excepto en DFM y NRE, donde el valor en riego fue menor que en temporal o sequía (Cuadros 13A y 14A).

La comparación de medias del análisis combinado de los caracteres estudiados en los ciclos de Zacatecas 58 y en los testigos (Cuadro 2.7), muestra que los testigos superaron en rendimiento a los ciclos avanzados, siendo el híbrido trilineal experimental del Colegio de Postgraduados (CP) el que en promedio de ambientes rindió 37% más. Por otra parte, los ciclos Z_{15} y Z_{18} tuvieron mayor rendimiento que los ciclos menos avanzados, del orden de 111.1% y 125.9%, respectivamente, siendo la diferencia estadísticamente significativa. Para el resto de caracteres se observa que en general mostraron una tendencia a incrementarse conforme se avanzó en la selección, excepto NRE que tuvo un comportamiento irregular.

La comparación de medias del análisis combinado de los ciclos de la variedad Cafime y de los testigos (Cuadro 2.8), muestra que los testigos superaron en rendimiento a los ciclos avanzados, siendo nuevamente el híbrido trilineal experimental del CP el que en promedio de ambientes rindió 34.5% más. Por otra parte, los ciclos C_{12} y C_{16} tuvieron mayor rendimiento que los ciclos menos avanzados, del orden de 32.4% y 38.9%, respectivamente siendo la diferencia estadísticamente significativa. Para el resto de caracteres, hubo una ligera tendencia de incremento en PS e IP, y una marcada tendencia de incremento en DFM, AP, AM, HAM, NHT, AHM, y NRE, mientras que DM, NHM, HARM, y LHM no sufrieron cambios sustantivos durante la selección, más aún, LM, NGH, y LRE tendieron a decrecer.

Cuadro 2.7. Comportamiento promedio de diecisiete caracteres de los ciclos de selección de Zacatecas 58 y de los testigos. Análisis combinado de tres ambientes. CP 2010, Montecillo, México.

Zacatecas 58	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Z0	51.3f	10.4d	3.8e	12.7e	23.8e	23.1d	0.9c	58.7f
Z3	56.5f	10.4d	3.9de	13.5de	24.2e	23.1d	0.8c	58.5f
Z6	70.3e	12.1bc	4.0cde	13.7cde	24.5de	26.1abc	0.9c	64.3e
Z9	82.1de	11.6c	4.1bcd	13.7cde	25.5cde	24.6bcd	0.9c	65.3d
Z12	93.3d	12.0bc	4.2bcd	14.0bcd	26.0cde	24.3bcd	1.2b	70.0c
Z15	108.3c	12.4abc	4.3bc	15.0ab	27.0bcd	22.2d	1.3ab	76.0b
Z18	115.9c	12.6ab	4.2bc	14.7abc	30.0a	23.9cd	1.3ab	77.2a
H-40	136.5b	13.2a	4.7a	15.6a	29.0ab	27.0ab	1.3ab	76.1b
H-trilineal	159.0a	13.3a	4.4b	14.4bcd	27.4abc	27.5a	1.4a	76.1b
DMS (0.05)	12.8	1.0	0.25	1.1	2.5	2.7	0.2	0.9

Cuadro 2.7. Continuación.

Zacatecas 58	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Z0	169.4e	75.6g	4.6e	3.4d	8.0e	64.5d	6.6f	31.1e	10.7cd
Z3	168.0e	69.8g	4.2e	3.7cd	8.0e	67.3d	6.9ef	33.3e	9.5d
Z6	202.5d	94.2f	5.2d	3.8c	8.8d	77.8c	7.7cd	36.3d	10.1d
Z9	212.9cd	106.2e	5.8cd	4.2b	10.2c	74.0c	7.3def	35.8d	13.3b
Z12	216.7c	117.5d	6.1c	4.3b	10.5c	79.0bc	7.6cde	38.1cd	12.1bc
Z15	246.5b	152.2b	7.2b	4.0bc	11.3b	84.7a	8.2c	39.4bc	7.2e
Z18	259.2a	156.3ab	7.1b	4.2b	11.4b	83.7ab	8.3c	40.4ab	9.6d
H-40	237.3b	133.4c	7.2b	5.1a	12.1a	85.2a	10.3a	42.0a	10.0d
H-trilineal	264.8a	162.8a	8.1a	4.2b	12.3a	84.1ab	9.3b	40.9ab	16.6a
DMS (0.05)	12.2	8.2	0.6	0.3	0.7	5.2	0.7	2.3	1.9

Medias con la misma letra (s) entre tratamientos son estadísticamente iguales con un $\alpha=0.05$, Z0= ciclo original de la variedad Zacatecas 58, Z3= ciclo tres de selección masal, Z6, Z9, Z12, Z18= ciclos avanzados de selección masal, H-40= Híbrido del INIFAP, H- trilineal= híbrido trilineal del CP, DMS: Diferencia mínima significativa, RPP= rendimiento por planta (g), LM= longitud de la mazorca (cm), DM= diámetro de la mazorca (cm), NHM= número de hileras por mazorca, NGH= número granos por hilera, PS= peso de cien semillas (g), IP= índice de prolificidad, DFM= días a floración masculina, AP= altura de planta (cm), AM= altura de mazorca (cm), HAM= hojas abajo de la mazorca, HARM= hojas arriba de la mazorca, NHT= número de hojas totales, LHM= longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM= ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE= longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE= número de ramas por espiga.

Cuadro 2.8. Comportamiento promedio de diecisiete caracteres de los ciclos de selección de Cafime y de los testigos. Análisis combinado de tres ambientes. CP 2010, Montecillo, México.

Cafime	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
C0	85.1f	14.0a	4.4b	14.2b	29.0a	25.6c	1.0d	67.4f
C3	89.0f	13.8ab	4.3b	14.2b	27.7ab	27.0c	0.8e	69.8e
C6	99.0e	12.0e	4.5ab	12.1d	24.6c	32.7a	1.0cd	70.7d
C9	106.7de	12.4cde	4.5ab	12.7cd	24.4c	30.7ab	1.1bc	72.1c
C12	112.7cd	12.9bcde	4.4ab	13.7bc	26.8b	27.2c	1.2b	77.4a
C16	118.2c	12.3de	4.4ab	13.5bc	26.2bc	27.9bc	1.2bc	78.0a
H-40	136.5b	13.2abcd	4.7a	15.6a	28.9a	26.9c	1.3ab	76.1b
H-trilineal	159.0a	13.3abc	4.4ab	14.4b	27.4ab	27.5bc	1.4a	76.1b
DMS (0.05)	8.4	0.9	0.3	1.0	2.0	3.2	0.1	0.8

Cuadro 2.8. Continuación.

Cafime	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
C0	224.1c	114.8c	6.2c	4.3bc	10.5b	86.6bc	8.1e	44.1a	11.7b
C3	221.6c	120.3bc	6.0c	4.2c	10.2b	84.3bc	8.2de	41.3bc	10.9b
C6	207.1d	121.6bc	6.4c	4.4bc	10.8b	75.9d	7.8e	37.3d	15.8a
C9	222.8c	127.1bc	6.4c	4.4bc	10.8b	84.7bc	8.4cde	38.5cd	16.1a
C12	244.1b	156.4a	7.5ab	4.6b	12.1a	91.1a	8.9bcd	40.1bcd	16.4a
C16	257.4a	154.9a	7.8ab	4.3bc	12.1a	88.5ab	9.1bc	39.6bcd	16.1a
H-40	237.3b	133.4b	7.2b	5.1a	12.1a	85.2bc	10.3a	42.0ab	10.0b
H-trilineal	264.8a	162.8a	8.1a	4.2c	12.3a	84.1c	9.3b	40.9bc	16.6a
DMS (0.05)	11.7	17.0	0.6	0.3	0.7	4.3	0.8	2.7	1.8

Medias con la misma letra (s) entre tratamientos son estadísticamente iguales con un $\alpha=0.05$, C0= ciclo original de la variedad Cafime, C3= ciclo tres de selección masal, C6, C9, C12, C16= ciclos avanzados de selección masal, H-40= Híbrido del INIFAP, H- trilineal= híbrido trilineal del CP. DMS: Diferencia mínima significativa, RPP= rendimiento por planta (g), LM= longitud de la mazorca (cm), DM= diámetro de la mazorca (cm), NHM= número de hileras por mazorca, NGH= número granos por hilera, PS= peso de cien semillas (g), IP= índice de prolificidad, DFM= días a floración masculina, AP= altura de planta (cm), AM= altura de mazorca (cm), HAM= hojas abajo de la mazorca, HARM= hojas arriba de la mazorca, NHT= número de hojas totales, LHM= longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM= ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE= longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE= número de ramas por espiga.

Correlación fenotípica

Los coeficientes de correlación fenotípica (r) del análisis combinado entre rendimiento (RPP) y sus componentes de los ciclos de Zacatecas 58, se observa que RPP correlacionó con todos los componentes del rendimiento, excepto PS, ya que los valores de los coeficientes resultaron ser positivos y mayores a 0.9 y altamente significativos (Cuadro 2.9). Por otro lado, en la correlación de RPP y los caracteres agronómicos se observa que ésta fue altamente significativa, positiva y cercana a la unidad, excepto para NRE (Cuadro 2.10).

Con respecto a la variedad Cafime, los coeficientes de correlación fenotípica (r) del análisis combinado entre rendimiento (RPP) y sus componentes de los ciclos de selección, se observa que solamente hubo correlación alta y significativa entre rendimiento e IP. Los demás componentes mostraron una relación irregular con rendimiento (Cuadro 2.9). Por otro lado, en la correlación entre RPP y los caracteres agronómicos se observa que ésta fue alta y significativa con DFM, AM, HAM, HT, AHM, y NRE (Cuadro 2.10).

Respuesta genética a la selección

En los coeficientes de regresión lineal simple de los ciclos de selección, tanto de la variedad Zacatecas 58 como los de Cafime en los ambientes de riego, sequía, temporal, y combinado del carácter RPP, y las líneas de regresión correspondientes a cada ambiente y variedad, se observa que el coeficiente de regresión resultó altamente significativo en todos los ambientes (Cuadro 2.11 y Figuras 1A al 6A del Apéndice), tanto en Zacatecas 58 como en Cafime, excepto en temporal en esta última variedad. El ajuste (R^2) resultó lineal con valores mayores a 0.93, excepto para Cafime en temporal. Los coeficientes de regresión lineal simple del análisis combinado resultaron con valores positivos altamente significativos, indicando una clara tendencia de incremento en RPP por cada ciclo de selección. El ajuste de las líneas de regresión de ambas variedades resultó ser casi perfecto (Figuras 2.1 y 2.2), con valores de R^2 de 0.99 y 0.97, respectivamente.

Cuadro 2.9. Coeficientes de correlación fenotípica entre rendimiento y sus componentes en Zacatecas 58 y Cafime del análisis combinado de ambientes. CP 2010, Montecillo, México.

Carácter	Componentes del rendimiento					
	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP
RPP (Zacatecas58)	0.903**	0.958**	0.931**	0.924**	-0.128	0.930**
RPP (Cafime)	-0.742	0.358	-0.317	-0.547	0.252	0.873*

Cuadro 2.10. Coeficientes de correlación fenotípica entre rendimiento y caracteres agronómicos en Zacatecas 58 y Cafime del análisis combinado de ambientes. CP 2010, Montecillo, México

Carácter	Caracteres agronómicos									
	DFM	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
RPP(Zacatecas58)	0.99**	0.984**	0.985**	0.979**	0.805*	0.983**	0.936**	0.926**	0.966**	-0.253
RPP (Cafime)	0.949**	0.706	0.899*	0.889*	0.672	0.904*	0.385	0.797	-0.578	0.881*

*, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP= rendimiento por planta (g), LM= longitud de la mazorca (cm), DM= diámetro de la mazorca (cm), NHM= número de hileras por mazorca, NGH= número granos por hilera, PS= peso de cien semillas (g), IP= índice de prolificidad, DFM= días a floración masculina, AP= altura de planta (cm), AM= altura de mazorca (cm), HAM= hojas abajo de la mazorca, HARM= hojas arriba de la mazorca, NHT= número de hojas totales, LHM= longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM= ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE= longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE= número de ramas por espiga.

Cuadro 2.11. Coeficientes de regresión lineal simple del rendimiento sobre ciclos de selección en Zacatecas 58 y en Cafime, en los ambientes riego, sequía, temporal y combinado de ambientes.

Ambiente	b_i	R^2
Zacatecas 58		
Riego	5.81**	0.98
Sequía	4.91**	0.99
Temporal	0.71**	0.97
Combinado	3.81**	0.99
Cafime		
Riego	4.57**	0.93
Sequía	2.55**	0.97
Temporal	-0.51	0.31
Combinado	2.20**	0.97

**Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; b_i = coeficiente de regresión.

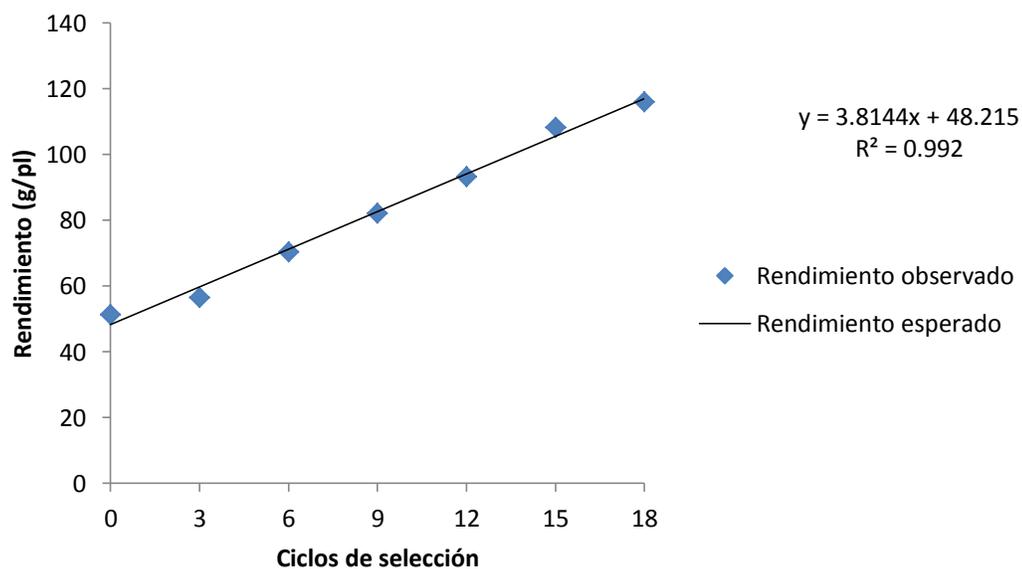


Figura 2.1. Regresión lineal simple del rendimiento sobre los ciclos de selección de Zacatecas 58. Análisis combinado de tres ambientes.

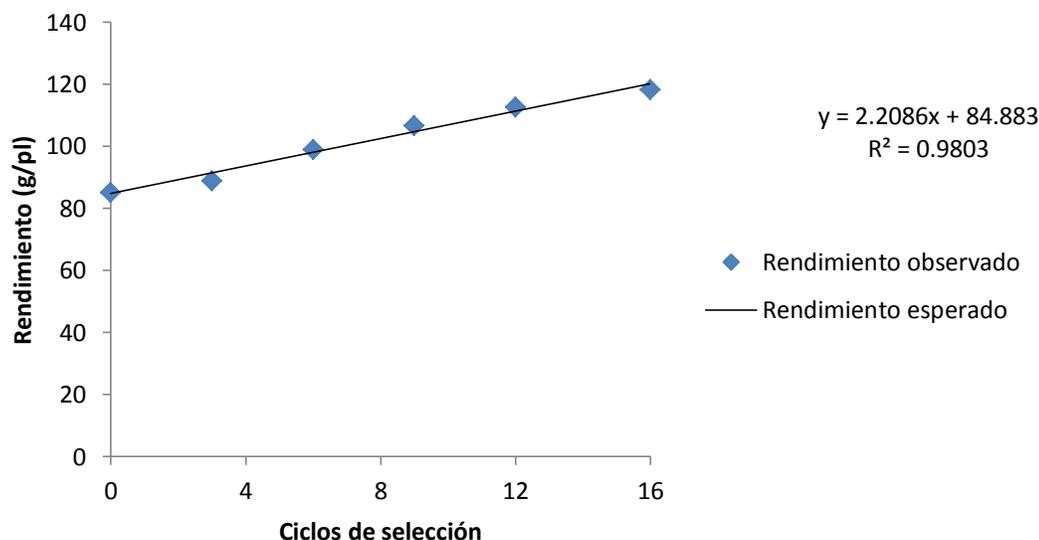


Figura 2.2. Regresión lineal simple del rendimiento sobre los ciclos de selección de Cafime. Análisis combinado de tres ambientes.

Respuesta observada a la selección

La respuesta observada del RPP a la selección masal (SMVE) fue positiva y significativa en ambas variedades. Para Zacatecas 58 la respuesta observada resultó,

$$\Delta G = \frac{3.814}{51.3} \times 100 = 7.4\%$$

indicando que por cada ciclo de selección que se avanzó se ganó 7.4% con respecto a la variedad original, lo cual significa que en 18 ciclos de selección se ha obtenido un 133.2% más de rendimiento con respecto al ciclo original. Este resultado indica que la selección efectuada ha sido muy efectiva, partiendo de 51.3 g por planta y llegando a 115.9 g en el ciclo avanzado de selección masal.

Con respecto a la variedad Cafime, la respuesta a la selección observada (ΔG) resultó

$$\Delta G = \frac{2.20}{85.1} \times 100 = 2.6\%$$

indicando que se tuvo un 2.6% de incremento con respecto a la variedad original, lo que significa que en 16 ciclos de selección, se ha obtenido un 41.5% más de rendimiento con

respecto al ciclo original. Este resultado indica que la selección aplicada ha sido efectiva, partiendo de 85.1 g por planta en C_0 y llegando a 118.2 g en el ciclo avanzado de selección masal.

2.6 Discusión

Análisis de Varianza

Tanto en los análisis de varianza por ambiente y combinado de ambientes de Zacatecas 58 y de Cafime, los coeficientes de variación (CV) obtenidos para los diferentes caracteres en estudio resultaron inferiores al 20% (Cuadros 1A al 12A, y 2.3 al 2.6), lo cual es un indicador de la confiabilidad de los datos experimentales, ya que de acuerdo con este parámetro, la desviación estándar de las mediciones en ambas poblaciones resultó menos del 20% de la media poblacional.

En cuanto a la variación del rendimiento (RPP) por ambiente (riego, sequía y temporal), las dos variedades tuvieron un comportamiento diferente en cada uno de ellos. Así, la varianza resultó mayor en el ambiente de riego y menor en el de temporal en las dos variedades (Cuadros 1A al 12A). Similar tendencia se encontró en algunos caracteres componentes del rendimiento tales como PS e IP en Zacatecas 58, y en NGH, PS, e IP en Cafime, los cuales al ser caracteres altamente cuantitativos resultaron influenciados de manera diferente por los ambientes. También algunos caracteres agronómicos importantes como AP, AM, NHT, LRE, y NRE, en Zacatecas 58 mostraron una tendencia a tener mayor varianza en Sequía, y la longitud de espiga varió más que número de ramas a través de ambientes. Algo parecido ocurrió en Cafime, excepto en los caracteres de la espiga, ya que en sequía y temporal el número de ramas de la espiga varió más que longitud de la rama primaria, indicando con ello que las dos variedades presentan un ajuste diferente a la transpiración, pues se sabe que la espiga es un órgano altamente transpiratorio en maíz, por lo que este factor podría tener alguna relación con el rendimiento diferente en ellas. Por otro lado, los DFM en Zacatecas 58 tuvieron un comportamiento inverso al RPP, pues su varianza resultó mayor en el ambiente de temporal que en el de riego, mientras que en Cafime fue mayor en riego que en temporal y sequía. Así mismo, en concordancia con los resultados anteriores, algunos de los

valores fenotípicos de los caracteres evaluados, incluido RPP y DFM tuvieron resultados diferentes a través de ambientes en las dos variedades (Cuadros 13A y 14A). Estos resultados eran de esperarse, ya que la selección masal tanto en Zacatecas 58 como en Cafime se hizo en condiciones de sequía o muy próximas a ella, en suelos con muy baja humedad, por lo que los genotipos de ambas poblaciones, al ser evaluados en un ambiente de riego, el cual fue muy diferente al de selección, expresaron un comportamiento distinto al que expresan en el ambiente de selección (Betancourt *et al.* 1974, García *et al.* 2002), esto porque los genotipos fueron seleccionados para adaptación a las condiciones de sequía. Lo anterior se corrobora con la interacción de las variedades x ambiente, donde el cuadrado medio para RPP resultó altamente significativo y con la magnitud mayor, indicando que hubo diferencias entre los valores de rendimiento de los genotipos de cada variedad a través de ambientes, al igual que entre los valores de los caracteres componentes del rendimiento y agronómicos anotados, lo que está en concordancia con lo señalado por Bucio (1966), en el sentido de que la interacción genotipo-ambiente es directamente proporcional a las diferencias entre ambientes, y también lo es directamente proporcional a las diferencias entre genotipos.

Con respecto a las comparaciones entre los promedios de los ciclos de selección de cada una de las poblaciones con el promedio de los testigos, y entre el promedio de los ciclos de selección de Zacatecas 58 con el promedio de los ciclos de Cafime, la varianza del RPP de tales comparaciones resultó siempre mayor en el ambiente de riego, y menor en el ambiente de temporal, lo cual está en concordancia con el resultado que mostró el RPP entre todos los genotipos evaluados en los ambientes (Cuadros 1A a 12A, y 2.3 a 2.6).

Comparación de medias

En el presente trabajo los ciclos más avanzados en ambas variedades siempre fueron estadísticamente superiores en rendimiento a los ciclos originales o menos avanzados (Cuadros 2.7 y 2.8), lo cual indica que la selección masal visual estratificada (SMVE) practicada en ambas variedades para el rendimiento individual, en poblaciones expuestas a escasez permanente de humedad en el suelo, fue efectiva para mejorar el rendimiento de grano (Molina, 1980), lo cual está en concordancia de que la selección al ser efectiva, implica un aumento de las frecuencias génicas de los genes favorables al rendimiento, mover

direccionalmente la media poblacional, y favorecer atributos o caracteres responsables de la resistencia a la sequía en los individuos seleccionados (Molina 1992, Molina 1980). En relación con los caracteres componentes del rendimiento en Zacatecas 58, LM, DM, NHM, NGH, e IP fueron los que cambiaron de Z_0 a Z_{18} . Estos cambios fueron del orden de 11% para DM al 38% para IP. Entonces es posible que dichos caracteres fueron los componentes que más influyeron en el incremento del rendimiento por efecto de la selección. Por otra parte, los 18 ciclos de selección masal en Zacatecas 58 original no modificaron al PS, pero sí incrementaron el ciclo vegetativo en 18 d, pues este pasó de 59 en Z_0 a 77 d en Z_{18} . Además, se incrementaron significativamente todos los caracteres agronómicos, excepto NRE. Esto indica que por efecto de la selección, las plantas de Z_{18} rindieron más que las de Z_0 , fueron más robustas en general, pero resultaron más tardías; esto porque durante la selección se escogieron las mejores mazorcas, que correspondieron a las plantas más tardías y vigorosas.

Con respecto a Cafime, el comportamiento promedio de los caracteres componentes del rendimiento y de los agronómicos fue diferente a lo encontrado en Zacatecas 58. Así, el único componente del rendimiento que tuvo un cambio significativo de C_0 a C_{16} fue IP, del orden de 38%, y PS tuvo una ligera tendencia a incrementarse; los demás componentes no se modificaron significativamente por efecto de la selección, e inclusive se observó una tendencia de reducción en LM y NGH de C_0 a C_{16} . Por otro lado, los caracteres agronómicos DFM, AP, AM, HAM, NHT, AHM, y NRE se incrementaron de C_0 a C_{16} por efecto de la selección, lo que indica que el compuesto de ciclo 16 de selección de Cafime rindió más que la variedad original C_0 , fue de plantas más robustas en general, pero resultó más tardío en 11 d, debido a que durante la selección se escogieron las mejores mazorcas, las cuales correspondieron a las plantas más tardías y vigorosas. Cabe resaltar que las HARM no se modificaron con la selección, ya que la diferencia AP-AM se mantuvo de C_0 a C_{16} , y también que LRE disminuyó con la selección, pero se aumentó NRE, indicando que la espiga tendió a ser más pequeña, pero más ramificada.

El comportamiento promedio de las dos variedades seleccionadas (Z_{18} y C_{16}) con respecto a los testigos H-40 y H-trilineal, indica que el compuesto de selección más avanzado en ambas fue superado estadísticamente en rendimiento por los dos testigos, y entre testigos, el

híbrido trilineal experimental del CP fue el que tuvo el rendimiento más alto. Esto se debió a que en comparación con Z₁₈, el híbrido trilineal, por provenir de Cafime, una variedad previamente mejorada (Medina y Gutiérrez, 2008) tuvo un mayor rendimiento por tener un mayor peso de semilla y además resultó ser de plantas más robustas y ligeramente más precoz. En contraste, con C₁₆ el híbrido trilineal tuvo igual peso de semilla, pero resultó con mazorcas más grandes y tendió a ser más prolífico y más precoz. No hubo diferencias en cuanto a la robustez de planta debido a que las líneas del híbrido trilineal fueron derivadas de los compuestos de selección más avanzados de Cafime, por lo que C₁₆ comparte el mismo patrimonio genético con el híbrido trilineal. Por otra parte, H-40 y el híbrido trilineal resultaron estadísticamente igual en los caracteres componentes del rendimiento, pero el rendimiento superior del híbrido trilineal se debió a que éste fue menos afectado por la helada temprana que ocurrió durante el periodo de llenado de grano de ambos materiales, pues en comparación con H-40, las mazorcas del H-trilineal estaban menos raquílicas y casi todos los granos estaban llenos.

La correlación fenotípica entre RPP y los caracteres componentes del rendimiento y agronómicos, resultó alta y significativa en Zacatecas 58, excepto con PS y RE. Esto indica que a medida que el rendimiento aumentó por efecto de la selección, los otros caracteres también se incrementaron, por lo que se puede decir que tuvieron una respuesta correlacionada o indirecta a la selección. No obstante, en Cafime ocurrió algo diferente, pues únicamente hubo correlación con IP y algunos caracteres agronómicos como DFM y NHT (Cuadros 2.9 y 2.10), a pesar de la clara respuesta lineal de incremento en RPP. Estos resultados sugieren que Cafime pudiera tener una variabilidad genética menor que Zacatecas 58, por lo que el efecto que tuvo la selección en los componentes del rendimiento y agronómicos fue diferente en ambas. Esto se refuerza por el hecho de que las variedades tuvieron diferente origen genético y geográfico (Wellhausen *et al.*, 1951; Luna *et al.*, 2005), pues Zacatecas 58 corresponde a la colecta de una población de amplia base genética, mientras que Cafime es la mezcla de siete cruza seleccionadas de alto rendimiento derivadas de la raza Bolita (Medina y Gutiérrez, 2008); además, Zacatecas 58 pertenece a la raza Cónico Norteño, la cual tiene una zona geográfica más amplia de distribución que la raza Bolita. Aunado a lo anterior, poblaciones

diferentes responden de manera diferente a la selección, aún cuando ésta se practique en el mismo ambiente y por los mismos mejoradores.

En cuanto a la respuesta a la selección, los coeficientes de regresión en ambas variedades indican que el ambiente de riego tuvo la mejor respuesta, pues al no haber limitaciones de humedad, los genotipos resistentes y los medianamente resistentes a sequía pudieron expresar al máximo su potencial de rendimiento, lo que también fue encontrado por Avendaño *et al.* (2008); en segundo lugar quedó el ambiente de sequía, y finalmente el de temporal, el cual tuvo los coeficientes menores e inclusive negativos en Cafime. Este último resultado se debió a que este ambiente de evaluación fue muy irregular en cuanto a las lluvias, y también afectó al cultivo de ambas poblaciones una helada temprana en el mes de septiembre, poco después de que llegaron a la floración y en pleno periodo de llenado de grano. No obstante, al combinar los ambientes se obtuvo una respuesta lineal consistente en los incrementos del rendimiento en ambas poblaciones; es decir, por cada ciclo de selección se incrementó el rendimiento de manera significativa. Los valores de R^2 de 0.99 y 0.97 para Zacatecas y Cafime, respectivamente, indican que más del 97% de la variación en el rendimiento observado pudo ser explicada por la relación lineal entre el rendimiento esperado y el número de ciclos de selección; es decir, que los valores observados prácticamente se ajustaron a la línea recta del modelo obtenido.

En cuanto a la respuesta observada, la selección masal de los genotipos más resistentes o tolerantes a la sequía en Zacatecas 58 fue casi el triple de eficiente que en aquella practicada en Cafime, siendo que el procedimiento de selección fue el mismo para ambas variedades. Esto confirma aún más que aun cuando las poblaciones tienen resistencia genética *per se* a la sequía por provenir de regiones áridas, su constitución y su variación genética son diferentes, y con ello la heredabilidad del carácter bajo selección resultará diferente entre ambas poblaciones, lo cual quedó evidenciado con las respuestas observadas tan contrastantes. Cabe resaltar que el rendimiento de los compuestos de ciclos de selección original fue muy diferente entre ambas poblaciones, siendo mayor el de Cafime, pero al final de 18 ciclos de SMVE en Zacatecas se igualó el rendimiento de Cafime obtenido en 16 ciclos de selección, dando una eficiencia de ganancia en gramos por ciclo de 1.73 veces de Zacatecas con respecto a Cafime.

Esto quiere decir que en Zacatecas se logró un avance mayor que en Cafime, pero también que en esta última variedad se pueden seguir obteniendo avances en el rendimiento, aunque más lentos que en Zacatecas 58.

2.7 Conclusiones

De acuerdo con los objetivos e hipótesis planteados y los resultados obtenidos, bajo las condiciones ambientales y experimentales en que se desarrolló el presente trabajo, se llegó a las siguientes conclusiones:

1. La selección masal visual estratificada que se hizo bajo condiciones de sequía o de muy baja humedad en el suelo, fue efectiva para incrementar significativamente el rendimiento de grano de las variedades Zacatecas 58 y Cafime.
2. La selección de mazorcas de mejor aspecto en ambas poblaciones ocasionó que las plantas de los compuestos de selección más avanzados presentaran cambios significativos en caracteres agronómicos y componentes del rendimiento, principalmente que las plantas se hicieran más altas, más tardías, y más robustas en general.
3. Los caracteres modificados en mayor magnitud durante la selección y que contribuyeron al rendimiento en Zacatecas 58, fueron los componentes del rendimiento medidos en la mazorca, excepto peso de semilla. En los agronómicos, los días a floración junto con características de la robustez de la planta, excepto el número de ramas de la espiga, tuvieron los mayores cambios.
4. En la variedad Cafime, únicamente los componentes del rendimiento peso de semilla e índice de prolificidad tuvieron incrementos durante la selección, mientras que para la robustez de la planta, altura de planta y de mazorca, junto con el número de hojas totales y el número de ramas de la espiga fueron los caracteres que más cambiaron durante la selección.

2.8 Literatura citada

- Avendaño A C H, J D Molina G, E C Moreno P, J Cadena I, J F Aguirre M, G Rincón E (2009)** Respuestas a la selección para resistencia a sequía en maíz (*Zea mays* L.). *Interciencia* 34: 801-807.
- Avendaño-Arrazate C H, JD Molina-Galán, C Trejo-López, C López-Castañeda, J Cadena-Iñiguez (2008)** Respuestas a altos niveles de estrés hídrico en maíz. *Agronomía Mesoamericana* 19 (1): 27-37.
- Betancourt V A, J D Molina G, H Angeles A (1974)** Comparación del potencial genético entre variedades de maíz no seleccionadas y mejoradas por selección masal como fuentes de líneas de alta aptitud combinatoria general. *Agrociencia* 16: 1-19.
- Bruce W B, G O Edmeades, and T C Baker (2002)** Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. *Journal of Experimental Botany* 53. 13-25.
- Bucio A L (1966)** Environmental and genotype-environmental components of variability. I. Inbred lines. *Heredity* 21: 387-397.
- Cakir R (2004)** Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research* 89: 1-16.
- Chávez A J L (1995)** Mejoramiento de Plantas 2: Métodos Específicos de Plantas Alógamas. Trillas-UAAAN. México, D. F. 143 p.
- De León N and J G Coors (2002)** Twenty-Four Cycles of Mass Selection for Prolificacy in the Golden Glow Maize Population. *Crop Science*, Vol. 42:325-333.
- Eyherabide G H, E Guevara, L Totis Z (1996)** Efectos del estrés hídrico en el rendimiento de maíz en Argentina In: *Developing Drought- and Low N- Tolerant Maize*. Edmeades GO, M Banziger, HR Mickelson, and CB Peña-Valdivia. CIMMYT, México, March 25-29. Technical Editors pp: 24-28
- Falconer D S and Mackay T F C (1996)** *Introduction to Quantitative Genetics*. 4th ed. Longman. England.
- García E (1988)** Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). UNAM. México, D. F. 217 p.

- García Z J, J López R, J D Molina G, y T Cervantes S (2002)** Selección masal visual estratificada y de familias de medios hermanos en una cruce intervarietal F2 de maíz. Rev. Fitotec. Mex. 25(4):387-391
- González Ch M, J L Pons H, J Arreola T, J Simpson (1994)** Identificación de los loci que controlan el intervalo de floración en maíz utilizando RFLP's. En: Memorias del XI Congreso Latinoamericano de Genética y XV Congreso de Fitogenética.
- Hallauer A R, M J Carena, and J B Miranda F (2010)** Quantitative Genetics in Maize Breeding. Iowa State University Press. USA. 663 p
- Hanson A D, C E Nelsen and E H Everson (1977)** Evaluation of free proline accumulation as an index of drought resistance using two contrasting barley cultivars. Crop Sci. 17:720-726.
- Luna F M y J L Zárate V (1994)** La producción de maíz en México ante el tratado del libre comercio. In: "El TLC y sus Repercusiones en el sector Agropecuario del Centro-Norte de México" Shwentwsius R R, M A Gómez C, JC Ledesma M, y C Gallegos V. (Eds.) CIESTAAM-UACH, Chapingo. Edo. De México. pp 1-27.
- Luna F M, J R Gutiérrez S, A Peña R, F G Echavarría C, J Martínez G (2005)** Comportamiento de variedades precoces de maíz en la región semiárida y árida del centro-norte de México. Revista Fitotecnia Mexicana 28: 39-45.
- Medina M E y Gutiérrez S Ricardo (2008)** Maíz Cafime, variedad de maíz que llegó para quedarse. <http://hdl.handle.net/123456789/2223> consultado en Marzo de 2012.
- Molina G J D (1980)** Selección masal para resistencia a sequía en maíz. Agrociencia 42:69-76
- Molina G J D (1983)** Selección Masal Visual Estratificada en Maíz. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx. Pub. Especial. 35 p.
- Molina G J D (1992)** Introducción a la Genética de Poblaciones y Cuantitativa. (Algunas Implicaciones en Genotecnia). AGT Editor. 349 pp.
- Montañez C y A Warman (1985)** Los productores de maíz en México. Restricciones y alternativas, Centro de Ecodesarrollo, México, D. F.
- Ortiz C J, L E Mendoza O, V A González H (1984)** Cambios en las características morfológicas y fisiotécnicas de maíz por efecto de la selección *in situ* y rotativa basada en el rendimiento de grano. Agrociencia 58: 153-163.

- Raya P J C, C B Peña-Valdivia, G O Edmeades (1996)** Procesos bioquímicos- fisiológicos del maíz involucrados en la tolerancia a sequía. In: Developing Drought- and Low N-Tolerant Maize. Edmeades G O, M Banziger, H R Mickelson, and C B Peña-Valdivia. CIMMYT, México, March 25-29. Technical Editors pp: 169-176.
- SIAP (2009) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.**
http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350 (Consultado en Agosto 2010)
- Vargas S J E, J D Molina G, T Cervantes S (1982)** Selección masal y parámetros genéticos en la variedad de maíz Zac. 58. Agrociencia 48:93-105.
- Wellhausen E J, LM Roberts, y E Hernández X. En colaboración con PC Mangelsdorf (1951)** Razas de Maíz en México. Su origen, características y distribución. OEE-SAG. Folleto No. 5. México, D. F. 236 p.

CAPÍTULO III. RENDIMIENTO Y CONTENIDO DE PROLINA EN MAÍZ SELECCIONADO PARA RESISTENCIA A SEQUÍA.

3.1. Resumen

El presente trabajo se realizó con el objetivo de estimar el avance genético promedio del rendimiento por ciclo de selección, de diferentes compuestos de selección masal visual estratificada (SMVE) practicada para resistencia a sequía en dos variedades de maíz (*Zea mays* L.), donde el rendimiento de grano fue el criterio de selección. También se tuvo como objetivos estimar el avance genético indirecto promedio del contenido de prolina (P) en las plantas de los diferentes ciclos de SMVE, y conocer si existe relación alguna entre RPP y P, esto para poder determinar si el P en la planta puede recomendarse como un criterio de selección para resistencia a sequía en maíz. Para evaluar el rendimiento en campo por un lado, y el contenido de prolina en invernadero y laboratorio por el otro, se usaron los siguientes materiales genéticos: ciclos de SMVE Z₀, Z₅, Z₁₀, y Z₁₅ de Zacatecas 58; ciclos de SMVE C₀, C₅, C₁₀, y C₁₆ de Cafime; y los híbridos H-40 y (T1 x T3) x T4 (H-trilineal experimental del Colegio de Postgraduados) como testigos. En campo, los materiales fueron evaluados en tres ambientes: riego (R), sequía (S) y temporal (T) en Montecillo, Texcoco, Estado de México, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La parcela experimental consistió de dos surcos de 4 m de largo separados a 0.8 m. Cada surco tuvo 11 matas de dos plantas cada 40 cm, teniéndose 44 plantas por parcela. Se obtuvo el rendimiento en kg de mazorca por planta (RPP) y se analizaron los datos mediante un análisis de varianza, una comparación de medias, y un análisis de regresión simple del rendimiento sobre el número de ciclos de SMVE. Para medir el P en las plantas, la evaluación también se hizo en Montecillo, bajo invernadero, en las condiciones hídricas de R y S. En S se sembraron todos los genotipos, y en R únicamente los ciclos originales Z₀ y C₀, los ciclos avanzados Z₁₅ y C₁₆, y los testigos H-40 y H-trilineal. Por cada genotipo se tuvieron 10 macetas de plástico con 4.5 kg de suelo de textura franco. La siembra se hizo depositando 4 semillas por maceta y se aclaró a dos plantas por maceta, teniéndose 20 plantas de cada material. La siembra se hizo en suelo seco y después se aplicaron riegos diarios con manguera y pistola de riego, hasta que las plantas presentaron la tercera hoja ligulada. En esta fase fenológica, todas las macetas fueron llevadas a capacidad de campo (CC), y a partir de ahí se suspendió el riego a los tratamientos

de S. El tratamiento de R consistió en mantener las macetas cerca de CC todo el tiempo. Cuando el tratamiento de S llegó a punto de marchitez permanente (PMP), se cosechó tejido de las plantas de R y S. De cada una de las 20 plantas de cada material, se cortó con tijeras 8 cm de largo de la tercera hoja ligulada; la muestra de tejido de cada planta se colocó en papel aluminio y se etiquetó para inmediatamente almacenarse en nitrógeno líquido. Posteriormente, las muestras se liofilizaron para evaluar el P por medio de una determinación colorimétrica. Los datos de P se analizaron mediante una comparación gráfica primero, y luego se hicieron una comparación de promedios por ciclo de SMVE, un análisis de regresión lineal simple del P sobre el número de ciclos de SMVE, un análisis de regresión del P sobre el RPP de cada ciclo, y una correlación fenotípica entre el P y el RPP. Los resultados indicaron que en el ambiente de R, sin restricciones de humedad, los materiales tuvieron los valores más altos de RPP, seguido por S y T. Los compuestos de ciclos de SMVE más avanzados rindieron más que los originales e intermedios, pero no igualaron a los testigos, de los que el mejor fue el H-trilineal, cuya base genética es Cafime y Zacatecas 58. La respuesta genética observada para RPP fue diferente en cada variedad, y esto dependió de la diferente constitución genética entre ellas. Así, ésta resultó 7.6% en Zacatecas 58, y 2.5% en Cafime, indicando con ello que en ambas variedades la SMVE para resistencia a sequía fue efectiva, pues se logró incrementar significativamente el rendimiento en cada ciclo de selección. Con respecto al P, se observó que en ambas variedades los compuestos de ciclos de SMVE más avanzados tuvieron en promedio mayor P en S que los compuestos originales e intermedios, y resultaron estadísticamente iguales a los testigos. Los ciclos originales y los ciclos más avanzados incrementaron hasta en 4.7 veces su P al pasar de una condición de R a una de S, mientras que el H-trilineal de base genética Cafime y Zacatecas 58 lo hizo hasta en 11 veces. La respuesta genética indirecta observada a la selección del P fue de 3.68% en Zacatecas 58 y 3.0% en Cafime, lo que indica que el seleccionar plantas resistentes o tolerantes a la sequía con base en su rendimiento, también aumentó de manera indirecta significativamente su P. Se encontró que el P y el RPP tuvieron una clara relación lineal altamente significativa en Zacatecas 58 ($b_i = 0.024^{**}$, $R^2=0.98$), no así en Cafime ($b_i = 0.033$, $R^2=0.81$), que solo mostró cierta tendencia de relación tipo lineal. Además, el valor de la correlación entre RPP y P fue 0.994 y altamente significativo en Zacatecas 58, mientras que en Cafime fue 0.900, un valor alto, pero no significativo. Estos resultados demuestran que existió una relación lineal entre el RPP y el P;

es decir, que conforme aumentó el rendimiento por efecto de la SMVE también aumentó indirectamente el contenido promedio de prolina en las plantas de los compuestos de ciclos de selección más avanzados en la misma proporción y sentido, lo que sugiere que el P puede considerarse como un criterio de selección en maíz para resistencia a sequía.

Palabras clave: *Zea mays* L., selección masal visual estratificada (SMVE), sequía, rendimiento, prolina, respuesta a la selección.

CHAPTER III. YIELD AND PROLINE CONTENT IN MAIZE SELECTED FOR DROUGHT RESISTANCE

3.2 Abstract

The objectives of this work were to estimate the average genetic gain for yield per selection cycle in different composites of stratified visual mass selection (SVMS) carried out for drought resistance in two maize (*Zea mays* L.) varieties, where the grain yield was the selection criterion; to estimate the indirect genetic gain for proline content (PC) in plants from the SVMS composites; and to know if there is a relationship between yield and PC in order to know whether PC qualifies as a selection criterion for drought resistance in maize. Yield was evaluated in the field for the following genotypes: SVMS composites Z₀, Z₅, Z₁₀, Z₁₅, (Zacatecas 58 maize variety), C₀, C₅, C₁₀, and C₁₆ (Cafime variety), and the hybrids for rainfall conditions H-40 (commercial) and (T1 x T3) x T4 (an experimental one from the Colegio de Postgraduados, Mexico) as checks. The genotypes were evaluated in three environments: under irrigation (I), drought (D), and rainfall conditions (R) in Montecillo, Texcoco, Mexico, in a randomized complete block design with three replications. Experimental units were two-row plots of 4 m in length with inter-row spacing of 0.8 m. and had 44 plants. Yield (Y) in kg of ears per plant was recorded. Data were analyzed using an analysis of variance followed by pairwise multiple comparisons of means and a simple linear regression of Y on the number of cycles of SVMS. To quantify the PC in plants and estimate the relationship between Y and PC, the same genotypes used to evaluate Y were planted also in Montecillo in a greenhouse in I and D conditions. All genotypes were planted in D, and only Z₀, Z₁₅, C₀, C₁₆, and the checks

were planted in I. Each genotype was planted in plastic pots that had 4.5 kg of loam soil. Four seeds per pot were sown and thinned to two plants, so that 20 plants were kept in each genotype. Sowing was done in dry soil and then the pots were irrigated constantly with a hose and a spray gun until plants had the third ligulated leaf. At this phenological stage, all the pots were saturated with water to allow the soil reached field capacity (FC), and starting from that point no more irrigation was provided to the pots in D. In the I treatment all the pots were irrigated and kept near FC all the time. When the plants in D treatment reached the permanent wilting point, 8 cm of tissue from the third ligulated leaf of all plants was cut with scissors, wrapped in foil, labeled, kept in liquid nitrogen, and liofilized to quantify the PC by a colorimetric determination. PC data were first analyzed using a graphic comparison and then by a comparison among the means of cycles of SVMS. It was also done two simple linear regression analyses, one of PC on the number of cycles of SVMS and the other of PC on the mean Y of each cycle. A phenotypic correlation between Y and PC was also calculated. Results showed that Y was greater in I, where no restrictions in humidity prevailed, than in D or R, and it was also greater in the advanced composites of SVMS, but these did not equate the Y of checks, from which the best was the experimental hybrid, formed with an inbred from Zacatecas 58 and two of Cafime. The observed genetic gain for Y was different in each variety, and this depended on the different genetic background between them. Thus, the genetic gain was 7.6% for Zacatecas 58 and 2.5% for Cafime. This meant that the SVMS for drought resistance was effective to significantly increase the yield every cycle of selection in both varieties. With respect to PC, results showed that the plants from the advanced composites of SVMS in both varieties had more PC in D and equate the PC value of the checks. The original and advanced cycles increased their PC up to 4.7 times when compared in I and D, and the experimental hybrid did increase its PC up to 11 times. Indirect genetic response for PC was 3.7% for Zacatecas 58 and 3.0% for Cafime, which meant that selection of resistant plants to drought based on their yield did indirectly increase their PC significantly. It was also found a strong linear relationship between Y and PC in Zacatecas 58 ($b_i = 0.024^{**}$, $R^2=0.98$) and a weak one in Cafime ($b_i = 0.033$, $R^2=0.81$). Moreover, the phenotypic correlation between Y and PC was 0.994** in Zacatecas 58 and 0.900 in Cafime. These results provided evidence that there was a linear relationship between Y and PC. That is to say that as yield increased by means of selection, PC in the plants was also increasing in the same

proportion and direction. It can be concluded that SVMS did increase directly Y and indirectly PC. Therefore, PC can be proposed as a selection criterion for drought resistance in maize.

Keywords: *Zea mays* L., drought, proline, response to selection, stratified visual mass selection (SVMS), yield

3.3 Introducción

La demanda de agua por la agricultura es cada vez mayor, y continuará siéndolo debido al aumento de la población mundial y a los efectos del cambio climático, a la escasez y lo errático de las lluvias, y a la alta evaporación en muchas regiones (Tardieu, 2005).

Entre los factores ambientales que afectan el crecimiento y desarrollo de los seres vivos, la escasez de agua es uno de los más importantes. Todas las plantas superiores están expuestas a la desecación por lo menos una vez durante su ciclo de vida, y a otros períodos de sequía moderada o grave durante sus fases de crecimiento vegetativo o reproductivo.

El déficit hídrico en las plantas provoca una serie de respuestas morfológicas, fisiológicas y fenológicas, las cuales pueden tener algún valor adaptativo, y por lo tanto conferir un cierto grado de tolerancia a esta condición de estrés (Dreesmann et al., 1994; Attipalli et al., 2004). En maíz (*Zea mays* L.), la sequía reduce el rendimiento de grano como consecuencia del menor número de granos por mazorca y peso del mismo, dependiendo de si ésta ocurre durante la floración o el periodo de llenado de grano (Stone et al., 2001).

Una alternativa para que la disminución del rendimiento de grano no sea significativa, es el uso de variedades tolerantes a la sequía (Raya et al., 1996). Por ello, es necesario mejorar las poblaciones con tolerancia o resistencia *per se* a la sequía para hacerlas más productivas y para que sirvan como fuentes genéticas de resistencia para otras variedades que no amortiguan bien los efectos de los factores ambientales adversos, pero que tienen otros atributos.

El mejoramiento poblacional mediante selección masal permite generar variedades mejoradas de polinización libre, las cuales son convenientes para agricultores que no cuentan con los recursos para adquirir semilla híbrida (Hallauer *et al.*, 2010), ya que los individuos seleccionados poseen genes superiores, que al recombinarse al azar producen nuevos genotipos más productivos. El incremento que se logre en cada ciclo de selección estará en función de la variabilidad genética de la población bajo mejoramiento y de la heredabilidad del carácter (Falconer, 1996, Chávez 1995).

Con respecto al mejoramiento poblacional en maíz para resistencia a sequía, Molina (1980), menciona que la selección masal es efectiva para mejorar la resistencia genética a sequía cuando se usa el rendimiento de grano como criterio de selección. Este autor estimó el avance genético por ciclo de selección en las variedades Zacatecas 58 (seis ciclos) y Cafime (con cinco ciclos de selección), evaluadas en sequía y temporal, y encontró un avance promedio por ciclo de 2.2 a 14.5% en sequía y de 1.6 a 11.2% en temporal para Zacatecas 58; en la variedad Cafime el avance genético varió de 0.6 a 8.0% en sequía, y de 0.6 a 25.3% en temporal. El rendimiento promedio por planta resultó ser mayor en sequía que en temporal, debido a que el ciclo vegetativo es mayor en siembras de primavera (sequía) que en las siembras de verano (temporal).

En México, aproximadamente el 85% de la producción de maíz se lleva a cabo en zonas temporaleras, donde la precipitación pluvial es escasa y su distribución aleatoria. La sequía afecta drásticamente el rendimiento del maíz, particularmente si ésta ocurre durante la floración o el llenado de grano. No obstante, se ha documentado que la falta de agua durante el desarrollo de las plantas provoca una acumulación de solutos como respuesta fisiológica al estrés hídrico (Attipalli *et al.*, 2004). La prolina es uno de ellos, y su función ha sido asociada a sostener la turgencia de los tejidos y a mantener la actividad enzimática en la célula (Ramanjulu y Sudhakar, 2000). Ésta, al ser altamente soluble en agua, es una de las sustancias que se acumula en las plantas, y es considerada como soluto compatible, atribuyéndosele también una función protectora de las proteínas (Samaras, 1995).

La acumulación de prolina durante el estrés hídrico en plantas ha sido evidenciada por varios autores (Aspinall y Paleg, 1981; Delauney y Verna, 1993; Hare y Cress, 1997), por lo que se ha sugerido que tal acumulación es ventajosa, y que podría ser utilizada como criterio de selección para formar cultivares más resistentes a la sequía (Singh y Rai, 1982; Singh *et al.*, 1973); en maíz, Verslues y Sharp (1999) y Ober y Sharp (1994) así lo han indicado. Sin embargo, otros autores sugieren que su acumulación es un síntoma del daño que el déficit hídrico ha causado en la planta (Hanson *et al.*, 1977; Hanson *et al.*, 1979).

Con respecto a la evaluación del contenido de prolina y su relación con resistencia a sequía en las variedades Zacatecas 58 y Cafime, Avendaño *et al.* (2005) encontraron que en el ambiente de riego se tuvo un promedio de 1.48 nmol g^{-1} en las dos variedades sin diferencia estadística entre ellas. También encontraron que en sequía se observó una acumulación de aproximadamente cuatro veces más en comparación con el ambiente de riego. Además, que la acumulación de prolina fue mayor en la variedad mejorada que en la original a medida que la sequía fue más severa. Concluyeron que la acumulación de este aminoácido entre otros, puede ser considerada como una respuesta fisiológica de las plantas para resistencia al estrés hídrico.

En relación con la respuesta de las plantas de maíz al estrés hídrico, Avendaño *et al.* (2008) encontraron que las variedades mejoradas por selección masal para resistencia a sequía mostraron mayor capacidad de recuperación que las no mejoradas una vez que cesó el estrés hídrico. Observaron que la sequía retrasó las floraciones masculinas y femeninas, y que el detenimiento del crecimiento vegetativo por efecto del estrés hídrico en las variedades mejoradas y su rápida recuperación, una vez cesado el estrés, fue un indicador de que dichas variedades, durante el proceso de selección han desarrollado mecanismos de resistencia que les permiten sobrevivir en condiciones de baja humedad. Se observó también que en el ambiente de sequía se obtuvieron los avances genéticos para rendimiento más altos por ciclo para las variedades Zacatecas 58 y Cafime, pero la mayor ganancia acumulada se encontró en condiciones de riego (Avendaño *et al.*, 2009).

Objetivos

Los objetivos del presente trabajo fueron: a) estimar el avance genético promedio del rendimiento de grano por ciclo de selección, de diferentes compuestos de selección masal visual estratificada (SMVE) de dos variedades de maíz seleccionadas para resistencia a sequía con base en el rendimiento de grano; b) evaluar el avance genético indirecto del contenido de prolina en diferentes ciclos de selección de dos variedades de maíz y su relación con el rendimiento de grano, y c) determinar si el contenido de prolina en la planta puede ser un criterio de selección para resistencia a sequía en maíz.

Hipótesis

a) La selección masal visual estratificada para resistencia a sequía, con base en el rendimiento de grano, realizada en las variedades de maíz Zacatecas 58 y Cafime, ha logrado incrementar el rendimiento de grano en los compuestos de ciclos de selección avanzados de ambas poblaciones.

b) La selección masal visual estratificada que se hizo para resistencia a sequía, con base en el rendimiento de grano ha incrementado indirectamente la frecuencia de genes para producir un mayor contenido de prolina en las plantas de los últimos ciclos de selección en ambas poblaciones como una respuesta al estrés hídrico al que se sometieron las plantas durante la selección.

c) El contenido de prolina en las plantas puede ser un criterio de selección para resistencia a sequía en maíz.

3.4 Materiales y métodos

A. Rendimiento

La evaluación de los materiales genéticos para rendimiento se llevó a cabo en el Campo Agrícola Experimental del Colegio de Postgraduados (CP), Campus Montecillo, Estado de México, ubicado en Montecillo, Texcoco, a 19° 28' 00'' N y 98° 54' 13'' O y a una altitud de 2250 msnm. El clima es de tipo Cb (wo) (w) (i') g, correspondiente a templado con

verano fresco largo, temperatura media anual entre 12 y 18 °C. El mes más frío oscila entre -3 y 18 °C, y el mes más cálido entre 6.5 y 22 °C. La precipitación media anual es de 637 mm (García, 1988).

El material genético evaluado comprendió compuestos de ciclos de selección de las variedades de maíz de polinización libre Zacatecas 58 y Cafime, más dos testigos. Zacatecas 58 es la colección #58 del estado de Zacatecas, procedente del municipio de Saint Alto, y pertenece a la raza Cónico Norteño (Wellhausen *et al.*, 1951). Es una variedad precoz en Chapingo; en siembras de verano la floración media es de 59 d y la madurez fisiológica aproximadamente de 98 d. Tiene un rango amplio de adaptación. (Molina 2011, comunicación personal). Cafime: pertenece a la raza Bolita (Wellhausen *et al.*, 1951) y como tal procede de las regiones secas de Oaxaca. Esta variedad fue liberada en 1958, y es el resultado de seleccionar visualmente y mezclar siete cruza resistentes a sequía derivadas de la raza Bolita, de una prueba hecha en 1957 en el Campo Experimental Francisco I. Madero, ubicado en Durango. Esta variedad es reconocida como la más tolerante y adaptada a las condiciones de sequía en siembras temporales de Durango. Tiene un ciclo vegetativo de 112 d, con 66 d a antesis (Medina y Gutiérrez, 2008). Los testigos fueron el H-40, que es un híbrido temporalero comercial del INIFAP, y el híbrido trilineal experimental ($T_1 \times T_3$) $\times T_4$ del Colegio de Postgraduados (H-trilineal) de base genética Cafime seleccionado por Molina (Com. Pers).

En el experimento se evaluaron las variedades de maíz Zacatecas 58 original (Z_0) y Cafime original (C_0) y algunos ciclos avanzados de cada una de ellas: Z_5 , Z_{10} , y Z_{15} de Zacatecas 58; y C_5 , C_{10} , y C_{16} de Cafime. Los compuestos de ciclos de selección de ambas variedades fueron obtenidos bajo el método de selección masal visual estratificada en suelos con muy baja humedad en Chapingo y Tecamac, Estado de México. Los materiales genéticos se evaluaron en tres ambientes: riego (R), sequía (S) y temporal (T), bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones por ambiente. Los experimentos de riego y de sequía se sembraron el 19 de Mayo del 2010 en suelo seco y se dio un riego de germinación.

En el experimento de riego (R) se aplicaron los riegos de auxilio necesarios para que no faltara humedad en el cultivo durante todo el ciclo. En el de sequía (S) sólo se aplicó un riego de auxilio 5 d después de la siembra para facilitar la emergencia, y posteriormente no se aplicaron riegos, y el cultivo quedó expuesto a la sequía hasta el establecimiento del temporal. Por otro lado, el experimento de temporal se sembró el 26 de Junio del 2010, una vez que se establecieron las lluvias.

Todos los experimentos estuvieron expuestos a la lluvia de temporal una vez que éste se estableció.

El rendimiento de mazorca por planta (RPP) fue el único carácter estudiado. Al momento de la cosecha, en cada parcela se tomó el peso total de mazorcas por parcela en g y también se contó el número de plantas, para determinar el rendimiento de mazorca por planta en g (RPP).

Análisis de la información

- a) Análisis de varianza y comparación de medias. Para cada variedad y carácter se efectuó el análisis de varianza por ambiente y combinado de ambientes, de acuerdo con la estructura que se presenta en los Cuadros 3.1 y 3.2, respectivamente. Para realizar los análisis de varianza de todas las fuentes de variación se usó el procedimiento PROC ANOVA de SAS (Versión 9.0, SAS Institute, 2002), excepto para comparar los promedios de los ciclos de selección de variedades con los promedios de los testigos, donde se usó el modelo lineal general (GLM) y el procedimiento CONTRAST. La comparación entre medias de RPP en cada variedad, se realizó con la Prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad, partiendo del análisis combinado de ambientes.

Cuadro 3.1. Estructura del análisis de varianza por ambiente. CP-2010, Montecillo, México.

Fuente de Variación	g. l.	Zacatecas 58	Cafime
Repeticiones	(r - 1)	2	2
Variedades	(v - 1)	5	5
Ciclos de Selección	(c - 1)	3	3
Testigos	(t - 1)	1	1
Ciclos de Selección vs Testigos		1	1
Error	(r - 1)(v - 1)	10	10
Total	rv - 1	15	15

Cuadro 3.2. Estructura del análisis de varianza combinado de ambientes. CP-2010, Montecillo, México.

Fuente de Variación	g.l.	Zacatecas 58	Cafime
Ambientes	(a-1)	2	2
Repeticiones/Ambientes	a(r-1)	6	6
Variedades	(v-1)	5	5
Ciclos de selección	(c-1)	3	3
Testigos	(t-1)	1	1
Ciclos de Selección vs Testigos		1	1
Variedades x Ambientes	(v-1)(a-1)	10	10
Error	a(v-1)(r-1)	30	30
Total	arv-1	45	45

b) Respuesta genética a la selección. La respuesta genética a la selección para el carácter RPP (Y) se estimó mediante el coeficiente de regresión lineal simple (b_i) sobre el número de ciclos de selección (X). En este análisis no se incluyeron los testigos. Se analizaron los datos de las dos variedades originales: Z_0 y C_0 , y los de los ciclos avanzados: Z_5 , Z_{10} , y Z_{15} y C_5 , C_{10} , y C_{16} de las variedades Zacatecas 58 y Cafime, respectivamente. El análisis de regresión para cada variedad se hizo considerando los datos de las tres repeticiones en los tres ambientes, mediante el procedimiento PROC REG de SAS.

c) Respuesta observada a la selección. La respuesta observada o avance genético (ΔG) a la selección para el carácter RPP en ambas variedades se calculó como el coeficiente de regresión (b_i) en porcentaje del valor fenotípico de la variedad original o ciclo cero, en la forma siguiente:

$$(\Delta G) = (b_i / C_0) \times 100$$

Donde:

ΔG = avance genético promedio por ciclo de selección

C_0 = Media del carácter en la variedad original

b_i = Coeficiente de regresión lineal simple

Multiplicando el ΔG promedio por ciclo de selección por el número de ciclos (15 para Zacatecas 58 ó 16 para Cafime), se obtuvo el ΔG total o acumulado en porcentaje con respecto a la variedad original.

B. Prolina

La obtención de los datos del contenido de prolina (P) se llevó a cabo en dos fases. La primera se hizo en invernadero, y consistió en la siembra y el establecimiento de los materiales genéticos para obtener el tejido vegetal y poder hacer la cuantificación. La segunda fase se hizo en el laboratorio, en el que se midió el contenido de prolina en los tejidos de los materiales evaluados. Ambas fases se hicieron en las instalaciones del Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados (CP), ubicado en Montecillo, Estado de México, a $19^{\circ} 27' 38''$ N y $98^{\circ} 54' 18''$ O y con una altitud de 2250 msnm (García, 1988).

El material genético evaluado comprendió las variedades de maíz Zacatecas 58 (Z_0) y Cafime (C_0) más algunos de los compuestos de ciclos de selección avanzados: Z_5 , Z_{10} , y Z_{15} de Zacatecas 58; y C_5 , C_{10} y C_{16} de Cafime, los cuales fueron obtenidos bajo el método de selección masal visual estratificada (SMVE) en suelos con muy baja humedad (Molina, 1983). También se incluyeron dos testigos: el híbrido temporalero comercial del INIFAP H-40 y la cruce trilineal experimental para temporal del Colegio de Postgraduados ($T_1 \times T_3$) $\times T_4$ (H-trilineal) de base genética Cafime seleccionada por Molina (Com. Pers).

En la primera fase se tuvieron dos condiciones hídricas, riego (R) y sequía (S). Todos los genotipos fueron sembrados en la condición de sequía, mientras que en riego únicamente se sembraron los ciclos originales Z_0 y C_0 y los ciclos avanzados Z_{15} y C_{16} , más los testigos H-40 y H-trilineal.

De cada material evaluado, tanto en sequía como en riego, se tomó una muestra de 40 semillas, las cuales se sembraron en macetas de plástico que tuvieron 4.5 kg de suelo de textura franco, con un contenido hídrico a capacidad de campo (CC) de 32 % y punto de marchitez permanente (PMP) de 16.7% de la curva de retención de humedad. La siembra se hizo depositando 4 semillas por maceta, por lo que se tuvieron 10 macetas por genotipo.

Posteriormente se aclaró a dos plantas por maceta, teniéndose 20 plantas de cada uno de los ciclos evaluados y de los testigos. En total se tuvieron 170 macetas (110 de sequía y 60 en riego).

Tanto en riego como en sequía la siembra se hizo el 25 de Septiembre del 2010 en suelo seco. Después de sembrar las semillas, se aplicó un riego pesado con manguera y pistola de riego, y posteriormente se aplicaron riegos ligeros diarios para recuperar la humedad perdida, hasta que las plantas presentaron la tercera hoja ligulada. A partir de esta fase fenológica, todas las macetas fueron llevadas a CC, y a partir de ahí se suspendió el riego a los tratamientos de sequía. El tratamiento de riego consistió en mantener las macetas cerca de a CC todo el tiempo.

Al momento en que el tratamiento de sequía llegó a PMP, que fue el 04 de noviembre del 2010, se cosechó tejido de las plantas de R y S. La cosecha consistió en cortar con tijeras 8 cm de largo de la tercera hoja ligulada de cada una de las plantas de cada maceta; la muestra de tejido de cada planta se colocó en papel aluminio y se etiquetó para inmediatamente almacenarse en nitrógeno líquido. Posteriormente, las muestras se liofilizaron para evaluar el contenido de prolina por el método colorimétrico desarrollado por Bates *et al.* (1973).

Análisis de la información.

- a) Comparación gráfica entre promedios de prolina de los ciclos de cada variedad. Se obtuvo un promedio general por ciclo y su respectivo error estándar, y también para los ciclos originales y el más avanzado en riego y sequía. Se usó la hoja de cálculo Excel (Microsoft, 2010) y posteriormente los resultados se graficaron en el paquete SigmaPlot Versión 11, de Systat Software, Inc., San José California USA, www.sigmaplot.com.
- b) Respuesta genética a la selección. La respuesta genética a la selección para el carácter P (Y) se estimó mediante el coeficiente de regresión lineal simple (b_i) sobre el número de ciclos de selección (X). Se analizaron los datos de las dos variedades originales: Z₀ y C₀, y los de los ciclos avanzados: Z₅, Z₁₀, y Z₁₅ y C₅, C₁₀, y C₁₆ de las variedades

Zacatecas 58 y Cafime, respectivamente. El análisis de regresión para cada variedad se hizo considerando los datos de P promedio en sequía y el ciclo de selección correspondiente, mediante el procedimiento PROC REG de SAS (Versión 9.0, SAS Institute, 2002).

- c) Respuesta observada a la selección. La respuesta observada o avance genético (ΔG) a la selección para el carácter P en ambas variedades se calculó como el coeficiente de regresión (b_i) en porcentaje del valor fenotípico de la variedad original o ciclo cero, en la forma siguiente:

$$(\Delta G) = (b_i / C_0) \times 100$$

Donde:

ΔG = avance genético promedio por ciclo de selección

C_0 = Media del carácter en la variedad original

b_i = Coeficiente de regresión lineal simple

Multiplicando el ΔG promedio por ciclo de selección por el número de ciclos (15 para Zacatecas 58 ó 16 para Cafime), se obtuvo el ΔG total o acumulado en porcentaje con respecto a la variedad original.

- d) Comparación de medias. La comparación entre promedios de prolina obtenidos en riego y sequía, entre el ciclo original con los demás ciclos, y entre el ciclo más avanzado con los testigos, se hizo con una prueba de t al 0.05 de significancia para muestras independientes de tamaño diferente con igual varianza (Snedecor y Cochran, 1989).

- e) Relación entre rendimiento y P. La relación entre los caracteres P y RPP se estimó mediante el coeficiente de regresión lineal simple (b_i) de P (Y) sobre el promedio de rendimiento de cada ciclo de selección (X). Se analizaron los datos de las dos variedades originales: Z_0 y C_0 , y los de los ciclos avanzados: Z_5 , Z_{10} , y Z_{15} y C_5 , C_{10} , y C_{16} de las variedades Zacatecas 58 y Cafime, respectivamente. El análisis de regresión para cada variedad se hizo considerando el promedio de RPP de los tres ambientes,

mediante el procedimiento PROC REG de SAS. También se hizo un análisis de correlación fenotípica para cada variedad considerando el promedio de rendimiento de los tres ambientes. Se correlacionó el carácter RPP con P. El análisis se hizo mediante el procedimiento PROC CORR de SAS.

3.5 Resultados

Análisis de varianza para RPP.

En los cuadrados medios del análisis de varianza individual de la variedad Zacatecas 58 y de la variedad Cafime incluyendo testigos (fuente de variación variedades), en los ambientes de riego, sequía y temporal, los resultados indican que hubo diferencias altamente significativas entre variedades para RPP en cada uno de los ambientes en cada población. Entre ciclos de Zacatecas 58, y entre el promedio de ciclos y el promedio de testigos, hubo diferencias altamente significativas para RPP en los tres ambientes. Entre ciclos de Cafime hubo diferencias altamente significativas para rendimiento en riego y sequía, mientras que en temporal las diferencias resultaron significativas. Por otro lado, entre el promedio de ciclos y el promedio de testigos, hubo diferencias altamente significativas para RPP en los tres ambientes en cada variedad (Cuadro 3.3).

Los resultados indican que entre el promedio de los ciclos de Zacatecas 58 y el de los ciclos de Cafime hubo diferencias altamente significativas para RPP en riego y sequía, mientras que en temporal la diferencia entre ambos promedios en RPP resultó no significativa (Cuadro 3.4).

En los análisis de varianza combinado de los ciclos de la variedad Zacatecas 58, de los ciclos de Cafime, y de ciclos de Zacatecas 58 más ciclos de Cafime, incluyendo los testigos en los dos primeros casos, y sin incluirlos en el tercero, se detectó diferencias altamente significativas entre ambientes, entre variedades, entre ciclos de selección tanto en Zacatecas 58 como en Cafime, entre el promedio de los ciclos de Zacatecas 58 más los ciclos de Cafime y el promedio de los testigos, así como entre el promedio de los ciclos de Zacatecas 58 y el promedio de los testigos, así como entre el promedio de los ciclos de Zacatecas 58 el

Cuadro 3.3. Cuadrados medios y coeficientes de variación del análisis de varianza individual por ambientes de la variedad Zacatecas 58 y de la variedad Cafime incluyendo testigos. CP-2010, Montecillo, México.

FV	Rendimiento por planta RPP					
	Zacatecas 58			Cafime		
	Riego	Sequía	Temporal	Riego	Sequía	Temporal
Reps	29.7	60.6	5.1	112.1	1.9	23.6
Var	12493.4**	8849.4**	395.0**	5752.8**	2910.8**	323.0**
Ciclos	4431.4**	3506.5**	63.7**	2718.3**	1068.0**	67.0*
Test	169.6	2886.4**	249.6**	169.6	2886.4**	249.6**
Ciclos vs Test	49003.2**	30841.2**	1534.0**	20439.4**	8464.0**	1164.0**
Error	26.3	26.0	4.5	69.0	12.4	10.3
C.V.	3.8	4.1	4.9	5.2	2.3	7.2
Media	133.2	121.8	42.9	159.3	149.6	44.6

FV: Fuente de variación, Reps: repeticiones, Var: variedades (Ciclos de selección y testigos), Ciclos: ciclos de Zacatecas 58 o Cafime, Test: Testigos, C.V.: Coeficiente de variación; *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente.

Cuadro 3.4. Cuadrados medios y coeficientes de variación del análisis de varianza individual por ambientes de los ciclos de Zacatecas 58 más los de Cafime. CP-2010, Montecillo, México

FV	Rendimiento por planta (RPP)		
	Riego	Sequía	Temporal
Reps	11.8	27.5	8.1
Var	4381.3**	3458.7**	61.5**
Zac	4431.3**	3506.5**	63.7**
Caf	2718.3**	1068.0**	67.0*
Zac vs Caf	9219.8**	10487.6**	38.2
Error	73.0	26.5	7.4
C.V.	7.3	4.5	7.2
Media	115.9	113.4	37.7

FV: Fuente de variación, Reps: repeticiones, Var: variedades (Ciclos de selección de Zacatecas 58 y Cafime), Zac: ciclos de selección de Zacatecas 58; Caf: ciclos de selección de Cafime; C.V.: Coeficiente de variación; *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente.

el promedio de los ciclos de Cafime. La interacción global variedades x ambientes resultó altamente significativa en los tres casos (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.5. Cuadrados medios y coeficientes de variación del análisis de varianza combinados de la variedad Zacatecas 58 y de la variedad Cafime, incluyendo testigos. Y Zacatecas 58 más Cafime. CP-2010, Montecillo, México.

Rendimiento por planta RPP				
FV	Zacatecas 58	Cafime	FV	Zac 58 y Caf
Ambs	43426.3**	72781.8**	Ambs	47389.0**
Reps/Ambs	31.8	45.9	Reps/Ambs	15.8
Vars	16708.8**	6488.5**	Vars	5407.9**
Ciclos	5954.5**	2012.0**	Zac	5954.6**
Test	2271.3**	2271.3**	Caf	2012.0**
Ciclos vs Test	63408.9**	24135.2**	Zac vs Caf	13955.6**
Var * Amb	2514.5**	1249.0**	Var * Amb	1246.8**
Error	18.9	30.6	Error	35.6
C.V.	4.3	4.7	C.V.	6.7
Media	99.3	117.8	Media	89.0

FV: Fuente de variación, Amb: ambientes, Reps/Amb: repetición entre ambientes, Var: variedades(Ciclos Zacatecas o Cafime con testigos, o Zacatecas y Cafime); Ciclos: Zacatecas o Cafime; Zac= ciclos de selección de Zacatecas 58; Caf= ciclos de selección de Cafime, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente.

El coeficiente de variación (C.V.) resultó de magnitud aceptable (<20%) en todos los análisis de varianza individuales y combinados del carácter rendimiento.

En los promedios generales del rendimiento por ambiente y combinado de ambientes de Zacatecas 58 y de Cafime, se observa que los valores fenotípicos promedio de RPP en ambas variedades tendieron a ser mayores en riego, y los valores menores se observaron en temporal, también los testigos superaron a los ciclos avanzados de ambas poblaciones en los tres ambientes y en el promedio de ambientes, siendo el híbrido trilineal experimental del Colegio de Postgraduados (CP) el que en promedio de ambientes rindió más. Por otra parte, los ciclos Z_{15} y C_{16} tuvieron mayor rendimiento que los ciclos menos avanzados, siendo la diferencia estadísticamente significativa (Cuadros 3.6 y 3.7).

Cuadro 3.6. Comportamiento promedio del rendimiento por ambiente y combinado de ambientes de Zacatecas 58 y de los testigos. CP 2010, Montecillo, México.

Ciclos	Riego	Sequía	Temporal	Combinado
Z0	59.70 d	62.40 e	31.80 e	51.30 f
Z5	72.33 d	70.00 e	33.83 de	58.72 e
Z10	108.10 c	100.06 d	38.06 cd	82.07 d
Z15	145.06 b	137.63 c	42.16 c	108.30 c
H-40	201.66 a	158.40 b	49.60 b	136.55 b
H-Trilineal	212.30 a	202.26 a	62.50 a	159.02 a
DMS (0.05)	14.55	14.46	6.06	6.24

Medias con la misma letra (s) entre tratamientos son estadísticamente iguales con un $\alpha=0.05$, Z₀= ciclo original de la variedad Zacatecas 58, Z₅= ciclo cinco de selección masal, Z₁₀ y Z₁₅= ciclos avanzados de selección masal, H-40= Híbrido del INIFAP, H- trilineal= híbrido trilineal del CP.

Cuadro 3.7. Comportamiento promedio del rendimiento por ambiente y combinado de ambientes de Cafime y de los testigos. CP 2010, Montecillo, México.

Cafime	Riego	Sequía	Temporal	Combinado
C0	97.56 d	112.13 e	45.83 bc	85.17 e
C5	125.96 c	125.53 d	37.96 cd	96.48 d
C10	153.66 b	146.90 c	35.03 d	111.86 c
C16	164.80 b	152.76 bc	37.13 cd	118.23 c
H-40	201.66 a	158.40 b	49.60 b	136.55 b
H-Trilineal	212.3 a	202.26 a	62.5 a	159.02 a
DMS (0.05)	23.56	10.00	9.12	7.93

Medias con la misma letra (s) entre tratamientos son estadísticamente iguales con un $\alpha=0.05$, C₀= ciclo original de la variedad Cafime, C₅= ciclo cinco de selección masal, C₁₀ y C₁₆= ciclos avanzados de selección masal, H-40= Híbrido del INIFAP, H- trilineal= híbrido trilineal del CP.

Respuesta genética a la selección para rendimiento

En los coeficientes de regresión lineal simple de los ciclos de selección, tanto de la variedad Zacatecas 58 como los de Cafime en los ambientes de riego, sequía y temporal del carácter RPP, y las líneas de regresión correspondientes a cada ambiente y variedad, se observa que el coeficiente de regresión resultó altamente significativo en todos los ambientes, tanto en Zacatecas 58 como en Cafime, excepto en temporal en esta última variedad. El ajuste

(R^2) resultó lineal con valores mayores a 0.93, excepto para Cafime en temporal (Cuadro 3.8; Figuras 7A al 12A).

Cuadro 3.8. Coeficientes de regresión lineal simple del rendimiento sobre ciclos de selección en Zacatecas 58 y en Cafime, en tres ambientes y combinado de ambientes (Cuadro 3.8; Figuras 7A al 12A).

Ambiente	bi	R^2
Zacatecas 58		
Riego	5.83*	0.96
Sequía	5.11*	0.93
Temporal	0.70*	0.97
Combinado	3.88*	0.95
Cafime		
Riego	4.28*	0.95
Sequía	2.67*	0.94
Temporal	-0.52	0.58
Combinado	2.14*	0.96

**Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; bi = coeficiente de regresión.

Los coeficientes de regresión lineal simple del análisis combinado del carácter RPP de los ciclos de selección, tanto de la variedad Zacatecas 58 como los de Cafime, resultaron con valores positivos altamente significativos, indicando una clara tendencia de incremento en RPP por cada ciclo de selección. El ajuste de las líneas de regresión de ambas variedades resultó ser casi perfecto (Figuras 3.1 y 3.2), con valores de R^2 de 0.95 y 0.96, respectivamente.

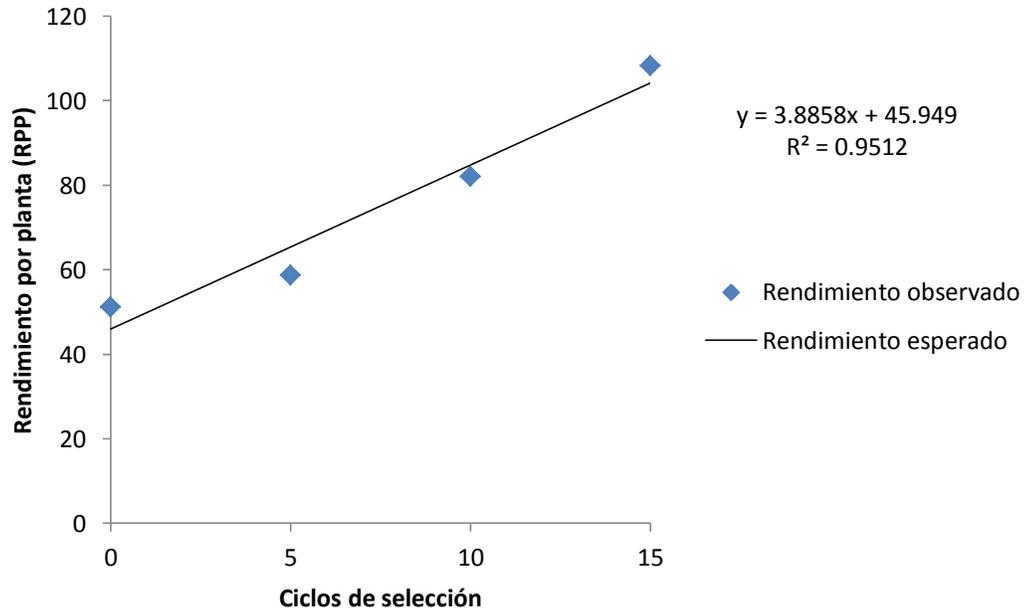


Figura 3.1. Regresión lineal simple del rendimiento sobre los ciclos de selección de Zacatecas 58. Análisis combinado de tres ambientes.

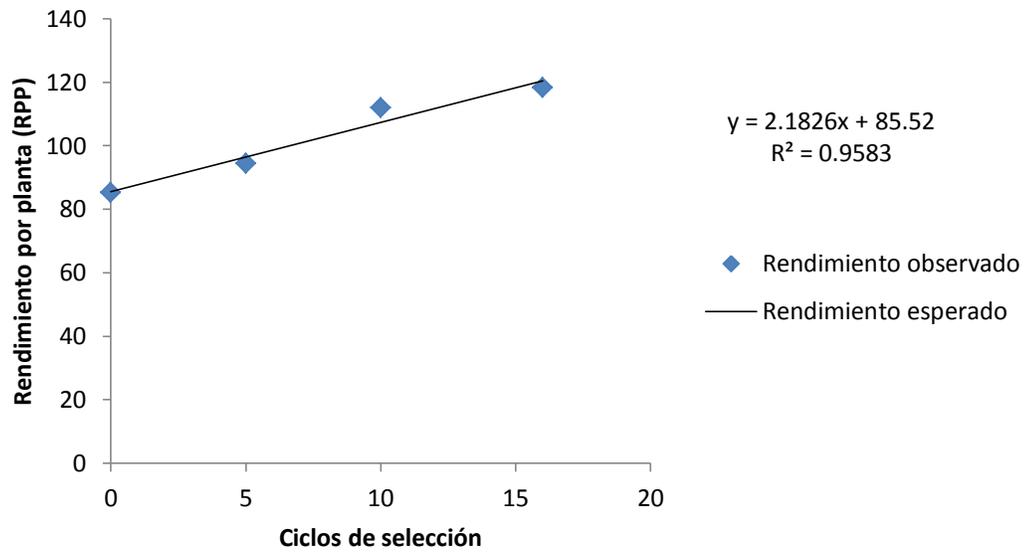


Figura 3.2. Regresión lineal simple del rendimiento sobre los ciclos de selección de Cafime. Análisis combinado de tres ambientes.

Respuesta observada a la selección en rendimiento.

La respuesta observada a la selección del RPP fue positiva y significativa en ambas variedades. Para Zacatecas 58 la respuesta observada resultó,

$$\Delta G = \frac{3.88}{51.3} \times 100 = 7.6\%$$

indicando que por cada ciclo de selección que se avanzó se ganó 7.6% con respecto a la variedad original, lo cual significa que en 15 ciclos de selección se ha obtenido un 114.0% más de rendimiento con respecto al ciclo original. Este resultado indica que la selección efectuada ha sido muy efectiva, partiendo de 51.3 gr por planta y llegando a 108.28 gr en el ciclo avanzado de selección masal.

Con respecto a la variedad Cafime, la respuesta a la selección observada (ΔG) resultó

$$\Delta G = \frac{2.14}{85.1} \times 100 = 2.5\%$$

indicando que se tiene un 2.5% de incremento con respecto a la variedad original, lo que significa que en 16 ciclos de selección, se ha obtenido un 40.0% más de rendimiento con respecto al ciclo original. Este resultado indica que la selección aplicada ha sido efectiva, partiendo de 85.1 gr por planta en C_0 y llegando a 118.2 gr en el ciclo avanzado de selección masal.

Contenido de prolina (P) y su relación con rendimiento (RPP)

a) Comparación gráfica de promedios de prolina entre ciclos para cada variedad

En la gráfica correspondiente a las variedades Zacatecas 58 y Cafime (Figura 3.3) se observa una clara tendencia de incremento del contenido promedio de prolina en los compuestos de los ciclos de selección evaluados en sequía (a y c). Por otro lado, en los ciclos originales y avanzados de ambas variedades evaluados en riego, el promedio siempre fue menor en comparación con el promedio de la evaluación de los mismos ciclos en sequía (b y d).

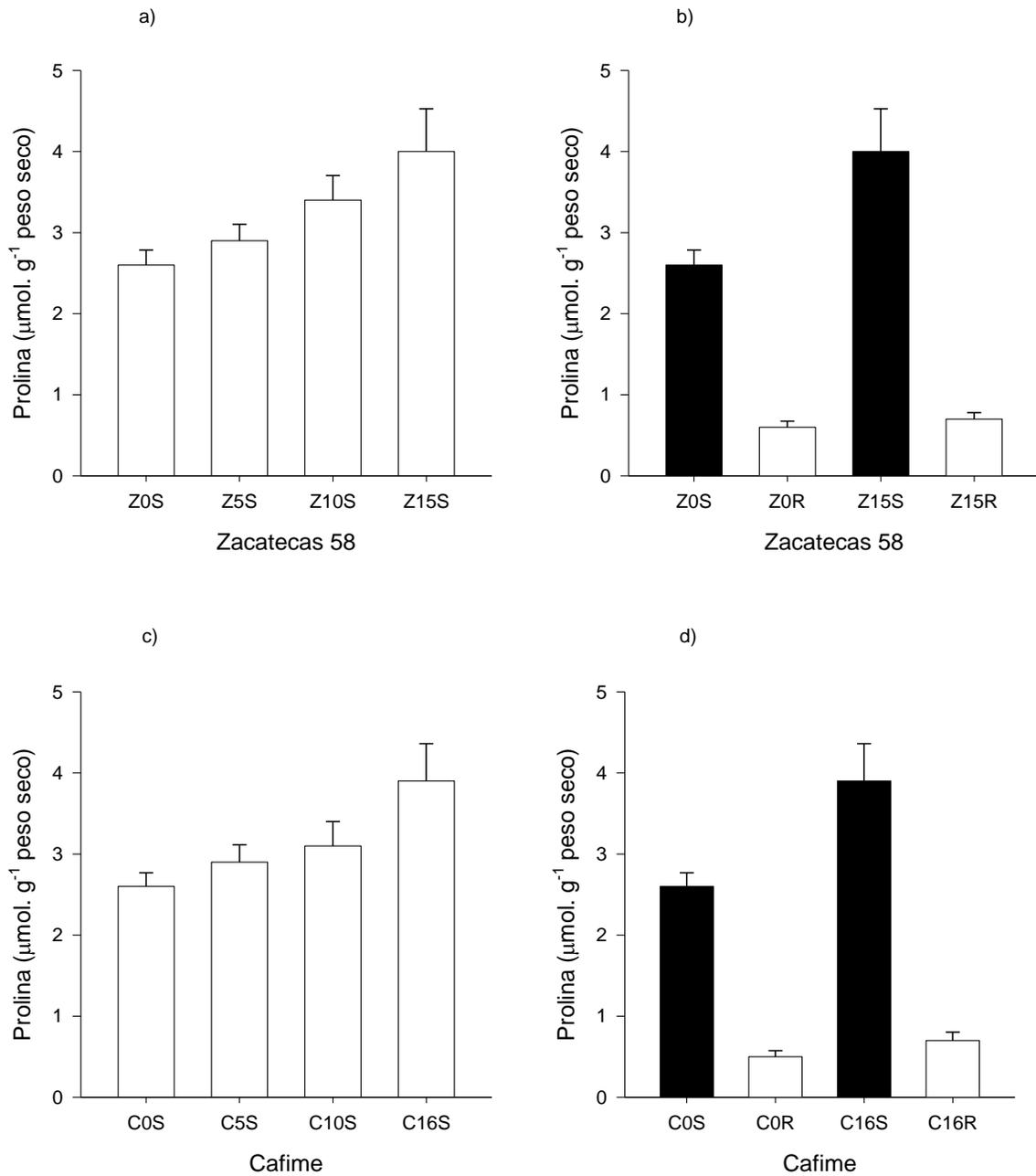


Figura 3.3. Concentración de prolina en la tercera hoja ligulada, **a)** ciclos de selección masal en la variedad de Zacatecas 58 (Z₀, Z₅, Z₁₀, Z₁₅); **b)** prolina en el ciclo original (Z₀) y avanzado (Z₁₅) en sequía y riego de zacatecas 58; **c)** ciclos de selección masal en la variedad de cafime (C₀, C₅, C₁₀ y C₁₆) en condiciones de sequía; **d)** contenido de prolina en ciclo original y avanzado de cafime en condiciones de sequía y riego. Las barras verticales indican \pm el error estándar.

b) Análisis de regresión.

Los coeficientes de regresión lineal simple de los ciclos de selección indirecta de la variedad Zacatecas 58 y de Cafime para el carácter contenido de prolina (P) resultaron con valores positivos significativos de 0.094 y 0.078, respectivamente, indicando una clara tendencia de incremento en P por cada ciclo de selección para rendimiento. El ajuste de las líneas de regresión para ambas variedades resultó ser lineal (Figuras 3.4 y 3.5), con valores de R^2 de 0.97 y 0.93, respectivamente.

c) Estimación del avance genético indirecto en P por efecto de la selección para rendimiento.

La respuesta observada a la selección indirecta para contenido de prolina en la variedad Zacatecas 58 y en la variedad Cafime fue positiva y significativa. Para Zacatecas 58 la respuesta observada resultó,

$$\Delta G = \frac{0.094}{2.55} \times 100 = 3.7\%$$

indicando que por cada ciclo de selección que se avanzó se ganó 3.7% más con respecto a la variedad original, lo cual significa que en 15 ciclos de selección se ha obtenido un 55.5% más de acumulación de prolina con respecto al ciclo original. Este resultado indica que la selección aplicada para incrementar el rendimiento y la resistencia a sequía ha sido efectiva para incrementar indirectamente el contenido de prolina en las plantas de los ciclos más avanzados, partiendo de 2.55 micro mol por gramo de peso seco por planta en Z_0 a 4.00 micromoles en el ciclo avanzado Z_{15} de selección masal.

Con respecto a la variedad Cafime, la respuesta a la selección indirecta observada (ΔG) resultó,

$$\Delta G = \frac{0.078}{2.60} \times 100 = 3.0\%$$

indicando que se tuvo un 3.0% de incremento con respecto a la variedad original, lo que significa que en 16 ciclos de selección, se ha obtenido un 48% más de contenido de prolina con respecto al ciclo original. Este resultado indica que la selección aplicada para mejorar el rendimiento de grano y para incrementar la resistencia o tolerancia a sequía, ha sido igualmente efectiva para incrementar indirectamente el contenido de prolina en las plantas de

los ciclos más avanzados, partiendo de 2.6 micromoles por gramo de peso seco por planta en C_0 y llegando a 3.90 micromoles por g de peso seco en el ciclo avanzado C_{16} de selección masal.

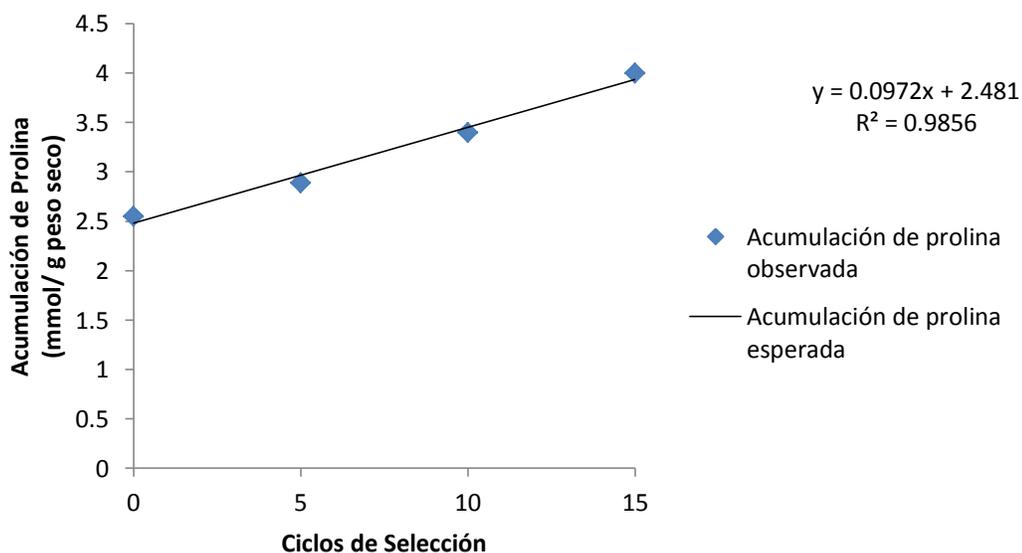


Figura 3.4. Regresión lineal simple del contenido de prolina sobre los ciclos de selección de Zacatecas 58 bajo condiciones de sequía en invernadero.

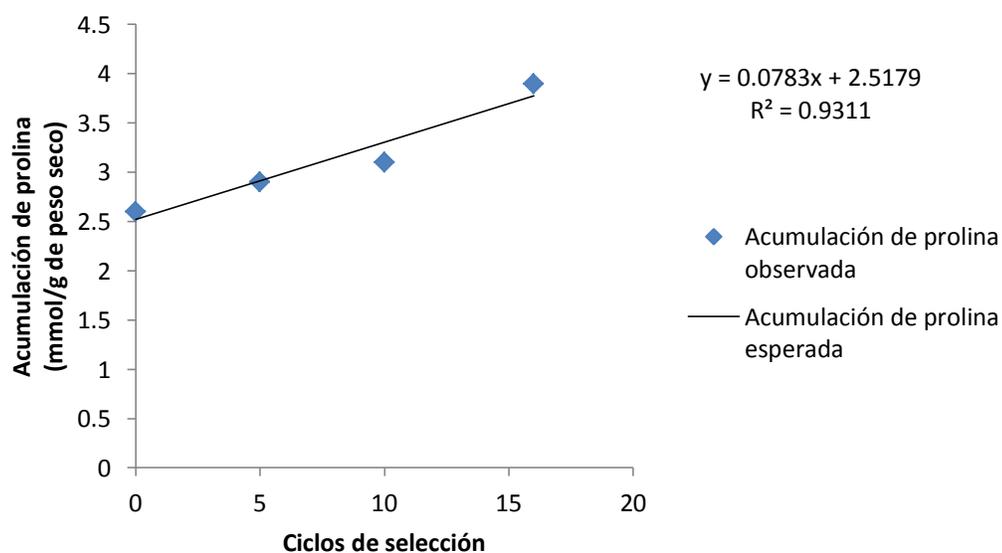


Figura 3.5. Regresión lineal simple del contenido de prolina sobre los ciclos de selección de Cafime bajo condiciones de sequía en invernadero.

d) Comparación de medias de Prolina

La comparación del contenido promedio de prolina de los genotipos evaluados en riego y sequía, indica que hubo diferencias altamente significativas entre los valores del ciclo original evaluado en riego y sequía en ambas variedades (Cuadro 3.9). Así mismo las hubo entre los valores de riego y sequía del ciclo más avanzado en ambas variedades. De igual manera, en ambos testigos hubo diferencias altamente significativas entre los valores promedio de riego y sequía. Los resultados también indican que para Zacatecas 58, Z_0 incrementó significativamente su contenido promedio de prolina hasta en 3.25 veces, al pasar de una condición de riego a una de sequía, y para el ciclo Z_{15} resultó de 4.72 veces, mientras que para Cafime el valor en C_0 resultó significativamente de 4.20, y de 4.60 veces en C_{16} . Lo anterior demuestra claramente que en condiciones de riego el contenido promedio de prolina de cada una de las plantas de los ciclos de ambas poblaciones resultó más bajo en comparación con las condiciones de sequía o estrés hídrico. Un resultado similar se encontró para los testigos, pues el H-trilineal tuvo un incremento del P de once veces al pasar de R a S, y el H-40 de 7.7 veces.

Cuadro 3.9. Contenido promedio de prolina en genotipos evaluados en riego y sequía y comparación entre promedios.

genotipos	riego	sequía	t_c
Z_0	0.60	2.55	10.044**
Z_5		2.89	
Z_{10}		3.40	
Z_{15}	0.70	4.00	7.947**
C_0	0.50	2.60	13.547**
C_5		2.90	
C_{10}		3.10	
C_{16}	0.70	3.90	9.342**
H-trilineal	0.26	3.13	12.000**
H-40	0.39	3.40	7.599**

**Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$) respectivamente; Z_0 = ciclo original de la variedad Zacatecas 58, Z_5 = ciclo cinco de selección masal, Z_{10} y Z_{15} = ciclos avanzados de selección masal; C_0 = ciclo original de la variedad Cafime, C_5 = ciclo cinco de selección masal, C_{10} y C_{16} = ciclos avanzados de selección masal; H- trilineal= híbrido trilineal del CP; H-40= Híbrido del INIFAP.

En la comparación entre el promedio del ciclo cero y el de ciclos avanzados en Zacatecas 58 y Cafime, para contenido de prolina en el ambiente de sequía, y la comparación entre los promedios de los ciclos avanzados y los promedios de los testigos, los resultados

indican que hubo diferencias significativas entre el valor de Z_0 y los de Z_{10} y Z_{15} , mientras que en Cafime únicamente los promedios de C_0 y C_{16} resultaron significativamente diferentes, pero la tendencia en esta variedad es que el contenido de prolina vaya aumentando conforme se avanza la selección (Cuadro 3.10 y Figuras 3.5 y 3.3). Por otra parte, entre los promedios de los ciclos avanzados de ambas variedades y entre los promedios de los testigos no hubo diferencias significativas, no obstante que los ciclos avanzados en ambas variedades resultaron numéricamente más altos que los testigos.

Cuadro 3.10. Comparación entre el promedio del ciclo cero y el de ciclos avanzados en Zacatecas 58 y Cafime, y comparación entre el promedio de ciclos avanzados y el de testigos para contenido de prolina en ambiente de sequía.

comparación	t_c
Z_0 vs Z_5 (2.55 vs 2.89)	1.231
Z_0 vs Z_{10} (2.55 vs 3.40)	2.519*
Z_0 vs Z_{15} (2.55 vs 4.00)	2.985*
Z_{15} vs H-40 (4.00 vs 3.40)	0.850
Z_{15} vs H. Tril (4.00 vs 3.13)	1.460
C_0 vs C_5 (2.60 vs 2.90)	1.114
C_0 vs C_{10} (2.60 vs 3.10)	1.530
C_0 vs C_{16} (2.60 vs 3.90)	2.676*
C_{16} vs H-40 (3.90 vs 3.40)	0.86
C_{16} vs H. Tril (3.90 vs 3.13)	1.60

*Significativo al 5% ($p \leq 0.05$); Z_0 = ciclo original de la variedad Zacatecas 58, Z_5 = ciclo cinco de selección masal, Z_{10} y Z_{15} = ciclos avanzados de selección masal; C_0 = ciclo original de la variedad Cafime, C_5 = ciclo cinco de selección masal, C_{10} y C_{16} = ciclos avanzados de selección masal; H- trilineal= hibrido trilineal del CP; H-40= Hibrido del INIFAP.

e) Relación entre RPP y P.

En los análisis de regresión lineal simple del contenido promedio de prolina sobre el rendimiento por ciclo en promedio de los tres ambientes (Figuras 3.6 y 3.7), y en el análisis de correlación fenotípica entre el rendimiento promedio de los tres ambientes y el P. Se encontró que el P y el RPP tuvieron una clara relación lineal altamente significativa en la variedad

Zacatecas 58 ($b_i = 0.024^{**}$, $R^2=0.98$), no así en Cafime, pues aunque el coeficiente de regresión resultó positivo ($b_i = 0.033$, $R^2=0.81$), este no fue significativo, y el ajuste fue menos lineal que el de Zacatecas 58. Por otro lado, para el caso de la variedad Zacatecas 58, el valor de la correlación fue 0.994 y altamente significativo, mientras que en Cafime el valor de la correlación fue 0.900, siendo un valor alto, pero resultó no significativo.

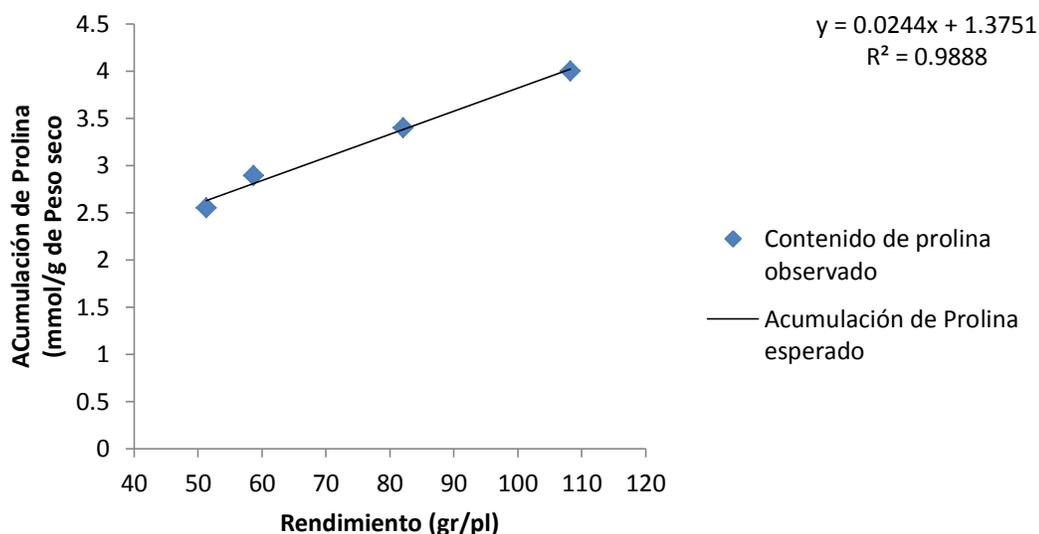


Figura 3.6. Regresión lineal simple del contenido de prolina sobre rendimiento por planta de los ciclos de selección de Zacatecas 58.

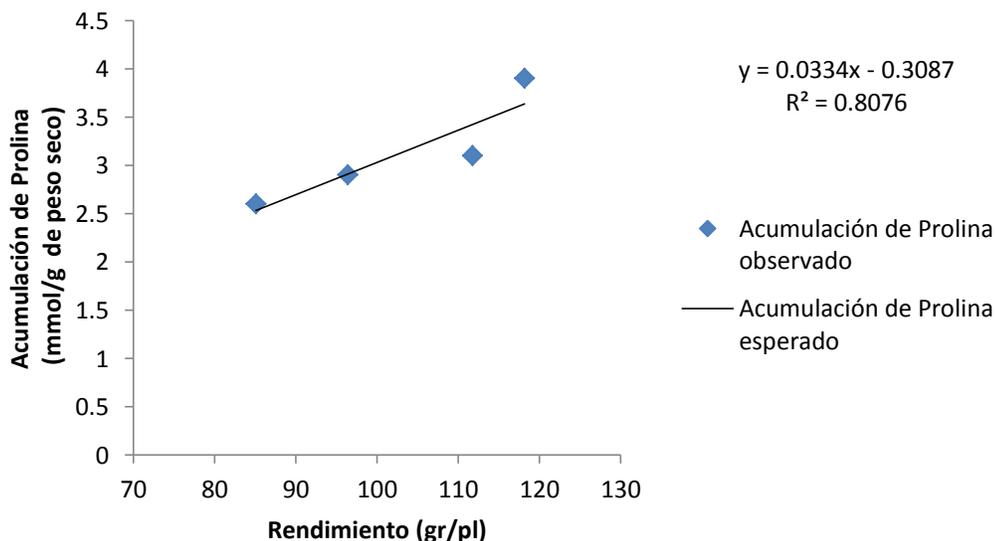


Figura 3.7. Regresión lineal simple del contenido de prolina sobre rendimiento por planta de los ciclos de selección de Cafime.

3.6 Discusión

Análisis de Varianza

Tanto en los análisis de varianza por ambiente y combinado de ambientes de Zacatecas 58 y de Cafime, los coeficientes de variación (CV) obtenidos para los diferentes caracteres en estudio resultaron inferiores al 20% (Cuadros 3.3 al 3.5), lo cual es un indicador de la confiabilidad de los datos experimentales, ya que de acuerdo con este parámetro, la desviación estándar de las mediciones en ambas poblaciones resultó menos del 20% de la media poblacional.

En cuanto a la variación del rendimiento (RPP) por ambiente (riego, sequía y temporal), las dos variedades tuvieron un comportamiento diferente en cada uno de ellos. Así, la varianza resultó mayor en el ambiente de riego y menor en el de temporal en las dos variedades (Cuadros 3.3), indicando que las medias de RPP y las diferencias entre parcelas y entre ciclos en este ambiente fueron mayores a las de los otros dos ambientes. Este resultado concuerda con lo encontrado por Luna et al. (2005) y Avendaño et al. (2008), quienes señalan que en los ambientes con mayor disponibilidad de humedad fue donde se encontraron los rendimientos más altos, en comparación con los ambientes donde la humedad fue más escasa, lo que indica que existió una relación directa entre el contenido de agua disponible en el suelo con el rendimiento.

Los resultados del análisis de varianza conjuntando los ciclos de Zacatecas 58 y los ciclos de Cafime por ambiente (Cuadro 3.4) y combinado de ambientes (Cuadro 3.5), indican que la varianza fenotípica de Zacatecas 58 resultó mayor que la de Cafime en riego y sequía, e iguales en temporal, y también mayor en el combinado. Este resultado puede deberse al diferente origen genético y geográfico de las variedades (Wellhausen *et al.*, 1951; Luna *et al.*, 2005), pues Zacatecas 58 corresponde a la colecta de una población de amplia base genética, mientras que Cafime es la mezcla de siete cruas seleccionadas de alto rendimiento derivadas de la raza Bolita (Medina y Gutiérrez, 2008); además, Zacatecas 58 pertenece a la raza Cónico Norteño, la cual tiene una zona geográfica más amplia de distribución que la raza Bolita, lo que pudiera contribuir a diferenciar aún más genéticamente a las poblaciones, pudiendo ser

Zacatecas 58 más variable que Cafime. Por otro lado, entre el promedio de los ciclos de Zacatecas 58 y el de los ciclos de Cafime hubo diferencias altamente significativas para RPP en riego y sequía (Cuadro 3.4), indicando que Cafime rindió más que Zacatecas 58 en promedio de esos ambientes (Cuadros 3.6 y 3.7), mientras que en temporal la diferencia entre ambos promedios resultó no significativa, esto debido a que el ambiente de temporal fue severamente afectado por heladas tempranas en ambas variedades. Esto coincide con Peña y Cortés (1988), quienes encontraron que entre más tardías son las variedades, mayor es el riesgo de pérdida por sequía y heladas, y Cafime es de mayor ciclo vegetativo que Zacatecas 58.

Por otro lado, tanto en los análisis individuales por ambiente como en el combinado de ambas poblaciones la comparación del promedio de los ciclos con el de los testigos resultó altamente significativa indicando que los testigos superaron en rendimiento a los ciclos más avanzados.

Puede decirse que los resultados obtenidos arriba eran de esperarse, ya que la selección masal (SMVE), tanto en Zacatecas 58 como en Cafime, se hizo en condiciones de sequía o muy próximas a ella, en suelos con muy baja humedad, por lo que los genotipos de ambas poblaciones, al ser evaluados en el ambiente de riego, que fue muy diferente al de selección, expresaron un comportamiento distinto al que expresan en el ambiente de selección, por estar más adaptados a las condiciones de éste (Betancourt *et al.* 1974, García *et al.* 2002). Lo anterior se corrobora con la interacción de las variedades x ambiente, donde el cuadrado medio para RPP resultó altamente significativo, indicando que hubo diferencias entre los valores de rendimiento de los genotipos de cada variedad a través de ambientes, lo que está en concordancia con lo señalado por Bucio (1966), en el sentido de que la interacción genotipo-ambiente es directamente proporcional a las diferencias entre ambientes, y también lo es directamente proporcional a las diferencias entre genotipos.

Comparación de medias

En el presente trabajo los ciclos más avanzados en ambas variedades siempre fueron estadísticamente superiores en rendimiento a los ciclos originales o menos avanzados

(Cuadros 3.6 y 3.7), lo cual indica que la selección masal visual estratificada practicada en ambas variedades para el rendimiento individual, en poblaciones expuestas a escasez permanente de humedad en el suelo, fue efectiva para mejorar el rendimiento de grano (Molina, 1980), lo cual está en concordancia de que la selección al ser efectiva, implica un aumento de las frecuencias génicas de los genes favorables para rendimiento, mover direccionalmente la media poblacional, y favorecer indirectamente atributos o caracteres responsables de la resistencia a la sequía en los individuos seleccionados (Molina 1992, Molina 1980).

El comportamiento promedio de las dos variedades seleccionadas (Z_{15} y C_{16}) con respecto a los testigos H-40 y H-trilineal, indica que el compuesto de selección más avanzado en ambas fue superado estadísticamente en rendimiento por los dos testigos, y entre testigos, el híbrido trilineal experimental del CP fue el que tuvo el rendimiento más alto. Esto se debió a que en comparación con Z_{15} , el híbrido trilineal, por provenir de Cafime, una variedad previamente mejorada (Medina y Gutiérrez, 2008) tuvo un mayor rendimiento; además, resultó ser de plantas más robustas y ligeramente más precoz. En contraste, con C_{16} el híbrido trilineal no tuvo diferencias en cuanto a la robustez de planta debido a que las líneas del híbrido trilineal fueron derivadas de los compuestos de selección más avanzados de Cafime, por lo que C_{16} comparte el mismo patrimonio genético con el híbrido trilineal. Por otra parte, H-40 y el híbrido trilineal resultaron estadísticamente igual en el ambiente de riego, pero diferentes en sequía y temporal, pero el rendimiento superior del híbrido trilineal se debió a que éste fue menos afectado por la helada temprana que sucedió durante el periodo de llenado de grano, pues en comparación con H-40, las mazorcas del H-trilineal estaban menos raquílicas y casi todos los granos estaban llenos.

En cuanto a la respuesta a la selección, los coeficientes de regresión en ambas variedades indican que el ambiente de riego tuvo la mejor respuesta, pues al no haber limitaciones de humedad, los genotipos resistentes a sequía e inclusive los menos tolerantes pudieron expresar al máximo su potencial de rendimiento, lo que también fue encontrado por Avendaño *et al.* (2008), en segundo lugar quedó el ambiente de sequía, y finalmente el de temporal, el cual tuvo los coeficientes menores e inclusive negativos en Cafime. Este último

resultado se debió a que este ambiente de evaluación fue muy irregular en cuanto a las lluvias, y también afectó al cultivo de ambas poblaciones una helada temprana en el mes de septiembre, poco después de que llegaron a la floración y en pleno periodo de llenado de grano. No obstante, al combinar los ambientes se obtuvo una respuesta lineal consistente en los incrementos del rendimiento en ambas poblaciones; es decir, por cada ciclo de selección se incrementó el rendimiento de manera significativa. Los valores de R^2 de 0.95 y 0.96 para Zacatecas y Cafime, respectivamente, indican que más del 95% de la variación en el rendimiento observado puede ser explicada por la relación lineal entre el rendimiento esperado y el número de ciclos de selección; es decir, que los valores observados prácticamente se ajustaron a la línea recta del modelo obtenido.

En cuanto a la respuesta observada, la selección masal de los genotipos más resistentes o tolerantes a la sequía en Zacatecas 58 fue el triple de eficiente que en aquella practicada en Cafime, siendo que el procedimiento de selección fue el mismo para ambas variedades. Esto confirma aún más que aun cuando las poblaciones tienen resistencia genética *per se* a la sequía por provenir de regiones áridas, su constitución y su variación genética son diferentes, y con ello la heredabilidad del carácter bajo selección resultará diferente entre ambas poblaciones, lo cual quedó evidenciado con las respuestas observadas tan contrastantes. Cabe resaltar que el rendimiento de los compuestos de ciclos de selección original fue muy diferente entre ambas poblaciones, siendo el de Cafime mayor, pero al final de 15 ciclos en Zacatecas casi igualó el rendimiento de Cafime obtenido en 16 ciclos de selección, dando una eficiencia de ganancia en gramos por ciclo de 1.84 veces de Zacatecas con respecto a Cafime. Esto quiere decir que en Zacatecas se logró un avance mayor que en Cafime, pero también que en esta última variedad se pueden seguir obteniendo avances en el rendimiento, aunque más lentos que en Zacatecas 58.

B. prolina

Comparación grafica de promedios de prolina. Al hacer selección para rendimiento en condiciones de sequía o de muy baja humedad en el suelo, se incrementó indirectamente el contenido promedio de prolina en las plantas. Esto se puede observar claramente en las graficas de ambas variedades (Figura 3.3), pues el promedio de prolina en sequía resultó más

de cuatro veces a el promedio obtenido en riego en los compuestos de ciclos de selección avanzados (Cuadro 3.9). Estos resultados coinciden con lo encontrado por Avendaño *et al.* (2005), quienes al aplicar diferentes niveles de estrés hídrico en maíz encontraron que el contenido promedio de prolina fue mayor en sequía que en riego y éste aún mayor en los ciclos avanzados. Lo anterior también evidencia que bajo condiciones de sequía extrema (PMP) las plantas de maíz producen altas cantidades de prolina.

Respuesta genética indirecta a la selección.

En cuanto a la respuesta a la selección, los coeficientes de regresión en ambas variedades indicaron que la acumulación de prolina tuvo una buena respuesta indirecta conforme se avanzó en la selección para rendimiento. Lo anterior quedó evidenciado por la respuesta lineal consistente en los incrementos del contenido de prolina en ambas poblaciones sobre el número de ciclos de selección; es decir, por cada ciclo de selección se incrementó indirectamente el contenido de prolina de manera significativa. Los valores de R^2 de 0.98 y 0.93 para Zacatecas y Cafime, respectivamente, indican que más del 93% de la variación observada en prolina puede ser explicada por la relación lineal entre el contenido de prolina esperado y el número de ciclos de selección; es decir, que los valores observados prácticamente se ajustaron a la línea recta del modelo obtenido.

Respuesta observada a la selección.

En cuanto a la respuesta indirecta observada para el carácter contenido de prolina, la selección masal de los genotipos más resistentes o tolerantes a la sequía con base en su rendimiento resultó más eficiente en Zacatecas 58 que en Cafime, lo cual podría tomarse como un indicador de que Zacatecas 58 tiene mayor variabilidad genética para el carácter acumulación de prolina que Cafime, y esto se apoya en el hecho de que proviene de una población de zonas áridas de amplia distribución y base genética. No obstante, en ambas poblaciones la selección para resistencia a sequía tomando al rendimiento como criterio de selección incrementa indirectamente de manera significativa el contenido de prolina.

Comparación de medias.

La significancia de la comparación de promedios de prolina en riego y sequía de ambas variedades, y aún de los testigos, indica que bajo condiciones de estrés hídrico severo las plantas acumulan prolina en sequía hasta en más de cuatro veces el acumulado en riego (Cuadro 3.9). Este resultado podría tomarse como un indicador de que el contenido de prolina en las plantas de maíz podría utilizarse como un criterio de selección de genotipos resistentes o tolerantes a la sequía primero, y después seleccionar a los que rinden más para recombinarlos y lograr una población de genotipos más rendidores y resistentes a la sequía. En apoyo de este resultado, se menciona lo encontrado por Avendaño *et al.* (2005), en el sentido de que en condiciones de riego el contenido de prolina resultó menor que en el ambiente de sequía. Por otro lado, el resultado anterior se vio confirmado por el hecho de que hubo significancia entre el promedio de los ciclos originales (Z_0 y C_0) y los promedios de los ciclos avanzados (Z_{15} y C_{16}), lo cual indica que la capacidad de las plantas para aumentar su contenido de prolina durante la sequía, se mejoró indirectamente en los ciclos avanzados. La comparación entre los ciclos avanzados de ambas poblaciones y los testigos resultó no significativa, porque estos últimos también tienen genes para tolerancia a sequía, pero numéricamente los ciclos avanzados resultaron con promedios algo mayores, lo cual podría tomarse como un indicador de una mayor tolerancia al estrés hídrico.

Relación entre el RPP y P

Se encontró que el P y el RPP tuvieron una clara relación lineal altamente significativa en la variedad Zacatecas 58 ($b_i = 0.024^{**}$, $R^2=0.98$), no así en Cafime, pues aunque el coeficiente de regresión resultó positivo ($b_i = 0.033$, $R^2=0.81$), este no fue significativo, y el ajuste fue menos lineal que el de Zacatecas 58. No obstante, puede decirse para Cafime que la tendencia es que exista una relación del tipo lineal entre el incremento en P y el incremento en RPP, pues así lo evidencian los resultados (Figura 3.7), solo que el cambio en P por cambio en RPP del ciclo 10 no tuvo la misma consistencia que en los demás ciclos, lo que causó que no se encontrara significancia estadística. Así pues, estos resultados demuestran que sí existió una relación directa entre el rendimiento y el contenido de prolina (Figuras 3.6 y 3.7); es decir, que conforme se aumentó el rendimiento por efecto de la selección (SMVE) también se aumentó

indirectamente el contenido promedio de prolina en las plantas de los compuestos de ciclos de selección más avanzados. Por otro lado, para el caso de la variedad Zacatecas 58, el valor de la correlación fue 0.994 y altamente significativo, mientras que en Cafime el valor de la correlación fue 0.900, siendo este un valor alto, pero resultó no significativo. Una posible explicación de la falta de consistencia en Cafime es que el maíz se heló en el experimento de temporal y los datos del rendimiento no fueron representativos, por tener un periodo de llenado de grano más largo que el de Zacatecas 58 (Luna et al., 2005; Medina y Gutiérrez, 2008).

3.7 Conclusiones

De acuerdo con los objetivos e hipótesis planteados y los resultados obtenidos, bajo las condiciones ambientales y experimentales en que se desarrolló el presente trabajo, se llegó a las siguientes conclusiones:

1. La selección masal visual estratificada que se hizo bajo condiciones de sequía o de muy baja humedad en el suelo, fue efectiva para incrementar significativamente el rendimiento de grano de las variedades Zacatecas 58 y Cafime.
2. La selección masal visual estratificada que se hizo bajo condiciones de sequía o de muy baja humedad en el suelo con base en el rendimiento de grano, fue efectiva para incrementar indirectamente de manera significativa el contenido promedio de prolina de las plantas de los compuestos de ciclos avanzados de selección de las variedades Zacatecas 58 y Cafime.
3. La acumulación de prolina y el rendimiento de grano tuvieron una clara relación lineal en la variedad Zacatecas 58, no así en Cafime, pues aunque el coeficiente de regresión resultó positivo, este no fue significativo, aunque el ajuste resultó lineal. No obstante, se puede decir que existió una relación lineal entre el incremento del contenido promedio de prolina y el incremento del rendimiento de grano durante la selección, pues así lo evidenciaron los resultados.

4. Conforme se aumentó el rendimiento por efecto de la selección (SMVE) también se aumentó indirectamente el contenido promedio de prolina en las plantas de los compuestos de los ciclos de selección más avanzados en la misma proporción y sentido. Esto permite concluir que el contenido de prolina en las plantas de maíz sometidas a estrés hídrico puede tomarse como un criterio de selección para resistencia a sequía en maíz.

3.8 Literatura citada

- Aspinall D and L G Paleg (1981)** Proline accumulation: physiological aspects. In: Paleg, L G y D Aspinall (eds.). *The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants*. Academic Press, Australia. pp. 205-241.
- Attipalli R R, Kolluru V C, Munusamy V (2004)** Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *J. Plant Physiol.* 161:1189-1202.
- Avendaño A C H, C Trejo L, C López C, J D Molina G, A Santacruz V, F Castillo G (2005)** Comparación de la tolerancia a la sequía de cuatro variedades de maíz (*Zea mays* L.) y su relación con la acumulación de prolina. *Interciencia* 30: 560-564.
- Avendaño A C H, J D Molina G, E C Moreno P, J Cadena I, J F Aguirre M, G Rincón E (2009)** Respuestas a la selección para resistencia a sequía en maíz (*Zea mays* L.). *Interciencia* 34: 801-807.
- Avendaño-Arrazate C H, JD Molina-Galán, C Trejo-López, C López-Castañeda, J Cadena-Iñiguez (2008)** Respuestas a altos niveles de estrés hídrico en maíz. *Agronomía Mesoamericana* 19 (1): 27-37.
- Bates L S (1973)** Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39,205-207.
- Betancourt V A, J D Molina G, H Angeles A (1974)** Comparación del potencial genético entre variedades de maíz no seleccionadas y mejoradas por selección masal como fuentes de líneas de alta aptitud combinatoria general. *Agrociencia* 16: 1-19.

- Bucio A L (1966)** Environmental and genotype-environmental components of variability. I. Inbred lines. *Heredity* 21: 387-397.
- Chávez A J L (1995)** Mejoramiento de Plantas 2: Métodos específicos de plantas alógamas. Trillas-UAAAN. México, D. F. 143 p.
- Delauney A J and D P S Verna (1993)** Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *Plant J.* 4:215-223
- Dreesmann D C, Harn C Daie J (1994)** Expression of genes encoding Rubisco in sugarbeet (*Beta vulgaris* L.) plants subjected to gradual desiccation. *Plant Cell Physiology*: 35: 645-653.
- Falconer D S and Mackay T F C (1996)** Introduction to Quantitative Genetics. 4th ed. Longman. England.
- García E (1988)** Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). UNAM. México, D. F. 217 p.
- García Z J, J López R, J D Molina G, y T Cervantes S (2002)** Selección masal visual estratificada y de familias de medios hermanos en una crucea intervarietal F2 de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(4):387-391
- Hallauer A R, M J Carena, and J B Miranda F (2010)** Quantitative Genetics in Maize Breeding. Iowa State University Press. USA. 663 p
- Hanson A D, C E Nelsen and E H Everson (1977)** Evaluation of free proline accumulation as an index of drought resistance using two contrasting barley cultivars. *Crop Sci.* 17:720-726.
- Hanson A D, W D Hitz, A R Pedersen and E H Everson (1979)** Capacity for proline accumulation during water stress in barley and its implications for breeding for drought resistance. *Crop Sci.* 19:489-493.
- Hare P D and W A Cress (1997)** Metabolic implications of stress induced proline Accumulation in plants. *Pl. Growth Regul.* 21:79-102.
- Luna F M, J R Gutiérrez S, A Peña R, F G Echavarría C, J Martínez G (2005)** Comportamiento de variedades precoces de maíz en la región semiárida y árida del centro-norte de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 28: 39-45.
- Medina M E y Gutiérrez S R (2008)** Maíz Cafime, variedad de maíz que llegó para quedarse. <http://hdl.handle.net/123456789/2223> consultado el Marzo de 2012.

- Molina G J D (1980)** Selección masal para resistencia a sequia en maíz. *Agrociencia*, Num. 42, p 69-76
- Molina G J D (1983)** Selección Masal Visual Estratificada en Maíz. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx. Pub. Especial. 35 p.
- Molina G J D (1992)** Introducción a la Genética de Poblaciones y Cuantitativa. (Algunas Implicaciones en Genotecnia). AGT Editor. 349 pp.
- Ober E S, R E Sharp (1994)** Proline accumulation in maize (*Zea mays* L.) primary roots at low water potentials. I. Requirement for increased levels of abscisic acid. *Plant Physiology* 105:981-987.
- Peña R A, J R Cortés N (1988)** Efecto de la precipitación pluvial en Los Llanos de Durango. *Revista Fitotecnia Mexicana* 11: 18-24.
- Ramanjulu S, Sudhakar C (2000)** Proline metabolism during dehydration in two mulberry genotypes with contrasting drought tolerance. *J. Plant Physiol.* 157:81-85.
- Raya P J C, C B Peña-Valdivia, G O Edmeades (1996)** Procesos bioquímicos- fisiológicos del maíz involucrados en la tolerancia a sequía. In: *Developing Drought- and Low N-Tolerant Maize*. Edmeades G O, M Banziger, H R Mickelson, and C B Peña-Valdivia. CIMMYT, México, March 25-29. Technical Editors pp: 169-176.
- Samaras Y, R A Bressan, L N Csonka, M G García-Ríos, D Urso P and D Rhodes (1995)** Proline accumulation during drought and salinity. In: *Environment and Plant Metabolism*. Ed. N. Smirnoff, 161-187. Bio Scientific Publisher Oxford.
- Singh G. and V K Rai (1982)** Responses to two differentially sensitive *Cicer arietinum* L. cultivars to water stress: protein content and drought resistance. *Biol. Pl.* 24:7-12.
- Singh T N, D Aspinall L G Paleg and S F Bogges (1973)** Stress metabolism. Changes in proline concentration in excised plant tissues. *Austr. J. Biol. Sci.* 26:57-63
- Snedecor W G, W G Cochran (1989)** *Statistical Methods*. Eighth edition, Iowa State University Press.
- Stone P J, Wilson D R, Reid J B, Gillespie R N (2001)** Water deficit effects on sweet corn. I Water use, radiation use efficiency, growth, and yield. *Aust. J. Agric. Res.* 52:103-113.
- Tardieu F, (2005)** Plant tolerance to water deficit: physical limits and possibilities for progress, *Comptes Rendus Geoscience* 337:57-65.

Verslues P E, and R E Sharp (1999) Proline accumulation in maize (*Zea mays* L.) primary roots at low water potentials. II. Metabolic source of increased proline deposition in the elongation zone. *Plant Physiology* 119: 1349-1360.

Wellhausen E J, LM Roberts, y E Hernández X. En colaboración con PC Mangelsdorf (1951) Razas de Maíz en México. Su origen, características y distribución. OEE-SAG. Folleto No. 5. México, D. F. 236 p

CAPITULO IV. DISCUSIÓN GENERAL

Los resultados obtenidos indicaron que las variedades de maíz Zacatecas 58 y Cafime respondieron de manera diferente en cada ambiente, aun cuando ambas fueron seleccionadas bajo el mismo método y por el mismo mejorador, esto debido a su diferente constitución genética y origen geográfico. La variación fenotípica para RPP que mostraron los compuestos de ciclos de selección de cada variedad, al evaluarlos en tres ambientes, fue mayor en el de riego, seguido por los de sequía y temporal. Lo anterior indicó que los compuestos al ser evaluados en ambientes diferentes al de selección, expresaron un comportamiento distinto al que expresaron en ambientes parecidos al de la selección (Betancourt *et al.* 1974, García *et al.* 2002). No obstante, ambas variedades mostraron incrementos significativos en RPP y cambios favorables en otras características debidos a la selección masal a las que fueron sometidas. Esto permite afirmar que la SMVE es un método que permite obtener variedades de alto rendimiento con resistencia a sequía y que las variedades pueden seguir siendo mejoradas, pues su variación fenotípica y su avance genético a si lo indicaron.

En cuanto al contenido de prolina, se encontró que por cada ciclo de selección masal para resistencia a sequía, tomando al rendimiento como criterio de selección, se incrementó indirectamente el contenido de prolina de manera significativa en ambas variedades. También se encontró que P y RPP tuvieron una clara relación lineal altamente significativa en la variedad Zacatecas 58, no así en Cafime, pues aunque el coeficiente de regresión y el valor de la correlación resultaron positivos, no fueron significativos. Pero puede decirse por los resultados que existió una relación de tipo lineal. La relación indicó que por cada unidad de incremento en RPP por la selección, indirectamente se incrementó P de manera proporcional, paralelamente y en el mismo sentido. Por lo anterior, se sugiere que el contenido de prolina en las plantas de maíz sometidas a estrés hídrico puede considerarse como un primer criterio de selección para resistencia a sequía en maíz, y segundo seleccionar las plantas de mayor rendimiento de grano.

La importancia del presente trabajo es que aporta evidencias de que se pueden iniciar programas de mejoramiento genético para resistencia a sequía en maíz con base en medir

primero el contenido de prolina en plantas individuales o líneas, seleccionando aquellas de mayor contenido, y después seleccionar las de mayor rendimiento de grano, recombinarlas y repetir el proceso.

Se puede partir de poblaciones originales con resistencia *per se* a la sequía o de compuestos de ciclos de selección avanzados que posean alta resistencia a la sequía y otros buenos atributos, por ejemplo los de las variedades de este estudio (Zacatecas 58 y Cafime), - cuyo H-trilineal experimental en este estudio fue el mejor genotipo-, que se pueden seguir mejorando, pero tomando como criterio principal el contenido de prolina y también el rendimiento de grano. Un proceso que agotaría más lentamente la variación genética y que se puede recomendar es aquél en el que la evaluación del contenido de prolina se haría en muchas plántulas, lo que permitiría seleccionar las plantas con mayor contenido de prolina, etiquetarlas y hacer una mezcla de polen entre ellas al momento de la floración para hacer cruzamientos fraternales (#) solamente entre ellas. Al momento de la cosecha se seleccionarían las mazorcas con las mejores características, que provendrán de plantas más rendidoras, esperándose que éstas sean las de mayor contenido de prolina. Con la semilla de esas mazorcas se haría un compuesto balanceado para sembrarlo nuevamente el siguiente ciclo de selección y se vuelve a repetir la técnica. A través de este método se espera que los ciclos avanzados sean más tolerantes o resistentes a la sequía y que también incrementen su rendimiento.

Otro método que se puede llevar a cabo es: 1) de los ciclos avanzados de la técnica anteriormente descrita, seleccionados por mayor contenido de prolina y rendimiento, se pueden derivar líneas que posean ambas características, evaluarlas por ACG y ACE y formar híbridos de temporal con mayor rendimiento; 2) Obtención de líneas partiendo de ciclos avanzados mejorados para resistencia a sequía donde se haya tomado como criterio de selección únicamente al rendimiento de grano, medir el contenido de prolina, y las que presenten mayor contenido autofecundarlas, y al momento de la cosecha seleccionar por mayor rendimiento, así se obtendría la S_1 , y se continuaría hasta llevarlas a S_6 y evaluarlas por su ACG y ACE y saber cuáles son las de mejor aptitud combinatoria para la formación de híbridos resistentes a sequía y más rendidores.

Las evaluaciones se podrían llevar a cabo en campo o en invernadero. En campo se sugiere que sean las siembras tempranas para tener un periodo más largo de sequía, pero tomando en cuenta que no afecte una helada tardía o temprana, o bien en invernadero para un mejor control de la sequía.

Un aspecto que debe cuidarse al momento de la selección es evitar que las mazorcas seleccionadas correspondan a las más húmedas, ya que éstas provienen de plantas más tardías, con esto se evitaría alargar el ciclo de las variedades y que alguna helada temprana disminuya drásticamente el rendimiento.

CAPITULO V. LITERATURA CITADA GENERAL

Allard R W (1975) Principios de la Mejora Genética de Plantas. Trad. J. L. Montoya. 2ª Ed. Omega. Barcelona, España. 498 p.

Andrade F H, A G Cirilo, S Uhart y M E Otegui (1996) Ecofisiología del Cultivo de Maíz. Editorial La Barrosa y Dekalb Press. Buenos Aires, Argentina. 292 p.

Ángeles A H (1961) Comentarios sobre la selección masal en el pasado y sus posibilidades en los programas actuales de mejoramiento de maíz. VII Reunión del PCCMCA. Tegucigalpa, Honduras. pp. 18-24.

Aspinall D and L G Paleg (1981) Proline accumulation: physiological aspects. In: Paleg, L G y D Aspinall (eds.). The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plantas. Academic Press, Australia. pp. 205-241.

Attipalli R R, Kolluru V C, Munusamy V (2004) Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. J. Plant Physiol. 161:1189-1202.

Avendaño A C H, C Trejo L, C López C, J D Molina G, A Santacruz V, F Castillo G (2005) Comparación de la tolerancia a la sequía de cuatro variedades de maíz (*Zea mays* L.) y su relación con la acumulación de prolina. Interciencia 30: 560-564.

- Avendaño A C H, J D Molina G, E C Moreno P, J Cadena I, J F Aguirre M, G Rincón E (2009)** Respuestas a la selección para resistencia a sequía en maíz (*Zea mays* L.). *Interciencia* 34: 801-807.
- Avendaño-Arrazate C H, JD Molina-Galán, C Trejo-López, C López-Castañeda, J Cadena-Iñiguez (2008)** Respuestas a altos niveles de estrés hídrico en maíz. *Agronomía Mesoamericana* 19 (1): 27-37.
- Bates L S (1973)** Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39,205-207.
- Betancourt V A, J D Molina G, H Angeles A (1974)** Comparación del potencial genético entre variedades de maíz no seleccionadas y mejoradas por selección masal como fuentes de líneas de alta aptitud combinatoria general. *Agrociencia* 16: 1-19.
- Borrás L, M E Otegui (2001)** Maize kernel weight response to postflowering source-sink ratio. *Crop Sci.* 49: 1816-1822.
- Bruce W B, G O Edmeades, and T C Baker (2002)** Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. *Journal of Experimental Botany* 53. 13-25.
- Bucio A L (1966)** Environmental and genotype-environmental components of variability. I. Inbred lines. *Heredity* 21: 387-397.
- Cakir R (2004)** Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research* 89: 1-16.
- Chávez A J L (1995)** Mejoramiento de Plantas 2: Métodos específicos de plantas alógamas. Trillas-UAAAN. México, D. F. 143 p.
- De la Rosa L A, H De León C, F Rincón S, G Martínez Z (2006)** Efectos genéticos, heterosis y diversidad genética entre híbridos comerciales de maíz adaptados a el Bajío Mexicano. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29 (3): 247-254.
- De León N and J G Coors (2002)** Twenty-Four Cycles of Mass Selection for Prolificacy in the Golden Glow Maize Population. *Crop Science* 42:325-333
- Delauney A J and D P S Verna (1993)** Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *Plant J.* 4:215-223

- Dreesmann D C, Harn C Daie J (1994)** Expression of genes encoding Rubisco in sugarbeet (*Beta vulgaris* L.) Plants subjected to gradual desiccation. *Plant Cell Physiology*: 35: 645-653.
- Eyherabide G H, E Guevara, L Totis Z (1996)** Efectos del estrés hídrico en el rendimiento de maíz en Argentina In: *Developing Drought- and Low N- Tolerant Maize*. Edmeades GO, M Banziger, HR Mickelson, and CB Peña-Valdivia. CIMMYT, México, March 25-29. Technical Editors pp: 24-28
- Falconer D S and Mackay T F C (1996)** *Introduction to Quantitative Genetics*. 4th ed. Longman. England.
- Food and Agriculture Organization (FAO) (2010)** FAOSTAT Crops Statistics. On line: FAOSTAT | © FAO Statistics Division 2010 | 20 November 2011.
- García E (1988)** Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). UNAM. México, D. F. 217 p.
- García Z J, J López R, J D Molina G, y T Cervantes S (2002)** Selección masal visual estratificada y de familias de medios hermanos en una crucea intervarietal F2 de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(4):387-391
- Gardner C O (1961)** An evaluation of effects of mass selection and seed irradiation with thermal neutrons on yield of corn. *Crop Science* 1: 241-245.
- González Ch M, J L Pons H, J Arreola T, J Simpson (1994)** Identificación de los loci que controlan el intervalo de floración en maíz utilizando RFLP's. En: *Memorias del XI Congreso Latinoamericano de Genética y XV Congreso de Fitogenética*.
- Hallauer A R, M J Carena, and J B Miranda F (2010)** *Quantitative Genetics in Maize Breeding*. Iowa State University Press. USA. 663 p
- Hanson A D, C E Nelsen and E H Everson (1977)** Evaluation of free proline accumulation as an index of drought resistance using two contrasting barley cultivars. *Crop Sci.* 17:720-726.
- Hanson A D, W D Hitz, A R Pedersen and E H Everson (1979)** Capacity for proline accumulation during water stress in barley and its implications for breeding for drought resistance. *Crop Sci.* 19:489-493.
- Hare P D and W A Cress (1997)** Metabolic implications of stress induced proline Accumulation in plants. *Pl. Growth Regul.* 21:79-102.

- Hernández S J H, A Muñoz O (1988)** Selección familiar bajo sequía en tres fuentes genéticas de maíz en la región de Chiautla, Puebla. *Agrociencia*, Área de resistencia a factores Adversos 74: 283-295.
- Luna F M y J L Zárata V (1994)** La producción de maíz en México ante el tratado del libre comercio. In: “El TLC y sus Repercusiones en el sector Agropecuario del Centro-Norte de México” Shwentwsius R R, M A Gómez C, JC Ledesma M, y C Gallegos V. (Eds.) CIESTAAM-UACH, Chapingo. Edo. De México. pp 1-27.
- Luna F M, J R Gutiérrez S, A Peña R, F G Echavarría C, J Martínez G (2005)** Comportamiento de variedades precoces de maíz en la región semiárida y árida del centro- norte de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 28: 39-45.
- Martínez-Zambrano G, J D Molina G, F Castillo-González, M Livera-Muñoz (2000)** Magnitud y linealidad de la respuesta a la selección en maíz en función de los ambientes de selección y de evaluación. *Agrociencia* 34: 429-436.
- Medina M E y Gutiérrez S R (2008)** Maíz Cafime, variedad de maíz que llegó para quedarse. <http://hdl.handle.net/123456789/2223> consultado el Marzo de 2012.
- Molina G J D (1980)** Selección masal para resistencia a sequía en maíz. *Agrociencia*, Num. 42, p 69-76
- Molina G J D (1983)** Selección Masal Visual Estratificada en Maíz. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx. Pub. Especial. 35 p.
- Molina G J D (1992)** Introducción a la Genética de Poblaciones y Cuantitativa. (Algunas Implicaciones en Genotecnia). AGT Editor. 349 pp.
- Moll R H, and C W Stuber (1974)** Quantitative genetics. Empirical results relevant to plant breeding. *Advances in Agronomy* 26: 277-313.
- Montañez C y A Warman (1985)** Los productores de maíz en México. Restricciones y alternativas, Centro de Ecodesarrollo, México, D. F.
- Ober E S, R E Sharp (1994)** Proline accumulation in maize (*Zea mays* L.) primary roots at low water potentials. I. Requirement for increased levels of abscisic acid. *Plant Physiology* 105:981-987.
- Ortiz C J, L E Mendoza O, V A González H (1984)** Cambios en las características morfológicas y fisiotécnicas de maíz por efecto de la selección in situ y rotativa basada en el rendimiento de grano. *Agrociencia* 58: 153-163.

- Peña R A, J R Cortés N (1988)** Efecto de la precipitación pluvial en Los Llanos de Durango. Revista Fitotecnia Mexicana 11: 18-24.
- Ramanjulu S, Sudhakar C (2000)** Proline metabolism during dehydration in two mulberry genotypes with contrasting drought tolerance. J. Plant Physiol. 157:81-85.
- Raya P J C, C B Peña-Valdivia, G O Edmeades (1996)** Procesos bioquímicos- fisiológicos del maíz involucrados en la tolerancia a sequía. In: Developing Drought- and Low N-Tolerant Maize. Edmeades G O, M Banziger, H R Mickelson, and C B Peña-Valdivia. CIMMYT, México, March 25-29. Technical Editors pp: 169-176.
- Reyes C P (1990)** El maíz y su cultivo. AGT Editor S. A. México, D. F. 460 p.
- Rincón T J A, S Castro N, J A López S, F Briones E, J Ortiz C, A J Huerta (2008)** Modificación de las características agronómicas en maíz tropical por efecto de la selección bajo estrés hídrico. Revista Fitotecnia Mexicana 31: 81-84.
- Samaras Y, R A Bressan, L N Csonka, M G García-Ríos, D Urso P and D Rhodes (1995)** Proline accumulation during drought and salinity. In: Environment and Plant Metabolism. Ed. N. Smirnov, 161-187. Bio Scientific Publisher Oxford.
- SIAP (2009) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.** http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350 (Consultado en Agosto 2010)
- SIAP-SAGARPA (2009) Anuario Estadístico de la Producción Agrícola.** <http://www.siap.gob.mx/ventana.php?idLiga=1043&tipo=1> (Consultado 20 de Agosto 2010).
- Singh G. and V K Rai (1982)** Responses to two differentially sensitive *Cicer arietinum L.* cultivars to water stress: protein content and drought resistance. Biol. Pl. 24:7-12.
- Singh T N, D Aspinall L G Paleg and S F Bogges (1973)** Stress metabolism. Changes in proline concentration in excised plant tissues. Austr. J. Biol. Sci. 26:57-63
- Snedecor W G, W G Cochran (1989)** Statistical Methods. Eighth edition, Iowa State University Press.
- Sprague G F (1955)** Corn Breeding. In: Corn and Corn Improvement. Acad. Press, Inc. NY. pp: 221-292.

- Stone P J, Wilson D R, Reid J B, Gillespie R N (2001)** Water deficit effects on sweet corn. I Water use, radiation use efficiency, growth, and yield. *Aust. J. Agric. Res.* 52:103-113.
- Tardieu F, (2005)** Plant tolerance to water deficit: physical limits and possibilities for progress, *Comptes Rendus Geoscience* 337:57-65.
- Vargas S J E, J D Molina G, T Cervantes S (1982)** Selección masal y parámetros genéticos en la variedad de maíz *Zac.* 58. *Agrociencia* 48:93-105.
- Verslues P E, and R E Sharp (1999)** Proline accumulation in maize (*Zea mays* L.) primary roots at low water potentials. II. Metabolic source of increased proline deposition in the elongation zone. *Plant Physiology* 119: 1349-1360.
- Wellhausen E J, L M Roberts, y E Hernández X. En colaboración con P C Mangelsdorf (1951)** Razas de Maíz en México. Su origen, características y distribución. OEE-SAG. Folleto No. 5. México, D. F. 236 p.

CAPITULO VI. APÉNDICE

Cuadro 1A. Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de Zacatecas 58 y testigos en condiciones de riego, en campo CP-2010.

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Reps	2	122.7	0.2	0.01	0.0	1.0	2.6	0.0	0.2
Var	8	9289.6**	2.9**	0.24**	2.6**	13.1**	22.9**	0.3**	179.1**
Zac	6	4326.6**	2.5**	0.08	2.1**	13.3**	12.0*	0.3**	158.6**
Test	1	169.6	0.1	0.54	4.5	0.0	0.2	0.1*	10.6*
Zac vs Test	1	48187.7**	7.6**	0.91**	3.2	24.5*	110.7**	0.5*	471.1**
Error	16	151.0	0.3	0.04	0.3	2.2	2.5	0.0	0.5
C.V.		9.6	4.4	4.69	4.0	5.2	5.4	13.7	1.0

Cuadro 1A. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Reps	2	52.8	17.2	0.7	0.1	0.9	16.5	0.2	0.9	1.2
Var	8	3715.2**	3688.2**	4.3**	0.8**	7.9**	238.8**	3.1**	30.6**	7.3**
Zac	6	3629.8**	3577.1**	3.3**	0.5**	6.1**	238.8**	0.6	20.6**	6.2**
Test	1	588.0**	807.3**	0.2	0.7**	0.0	38.0	0.006	4.6	19.0*
Zac vs Test	1	7355.0*	7235.6*	14.7**	2.0**	26.8**	439.7*	20.7**	116.7**	1.5
Error	16	28.8	9.0	0.1	0.0	0.1	9.6	0.3	1.6	0.7
C.V.		2.2	2.3	5.5	5.0	3.6	3.6	7.2	3.3	9.1

FV: Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Reps: repeticiones, Var: variedades, Zac: Ciclos de selección de Zacatecas 58, Test: Testigos, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP: rendimiento por planta (g), LM: longitud de la mazorca (cm), DM: diámetro de la mazorca (cm), NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número granos por hilera, PS: peso de cien semillas (g), IP: índice de prolificidad, DFM: días a floración masculina, AP: altura de planta (cm), AM: altura de mazorca (cm), HAM: hojas abajo de la mazorca, HARM: hojas arriba de la mazorca, NHT: número de hojas totales, LHM: longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM: ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE: longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE: número de ramas por espiga

Cuadro 2A. Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de Zacatecas 58 y testigos en condiciones de sequía, en campo CP-2010.

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Reps	2	35.8	0.1	0.01	0.3	7.8	4.2	0.0	2.2
Var	8	5980.1**	6.5**	0.33**	2.7**	22.9**	17.4**	0.2**	185.5**
Zac	6	3058.9**	5.6**	0.15**	1.5	24.3**	7.0	0.1**	174.1**
Test	1	2886.4**	0.2	0.08	2.4	22.0*	0.0	0.06**	1.5**
Zac vs Test	1	26601.1**	18.0**	1.58**	10.1**	15.5	96.9**	0.6**	438.2**
Error	16	50.2	0.5	0.02	0.5	1.8	4.4	0.01	0.2
C.V.		5.83	5.7	3.59	5.0	5.0	7.5	8.0	0.6

Cuadro 2 A. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Reps	2	115.9	7.1	0.2	0.1	0.6	4.7	0.5	0.7	0.4
Var	8	5102.9**	4388.6**	7.0**	0.8**	10.9**	148.2**	5.2**	63.0**	58.3**
Zac	6	5045.0**	4351.1**	4.8**	0.3**	8.1**	155.0**	1.1**	59.7**	43.5**
Test	1	365.0	1093.5**	1.7	2.1**	0.06	0.1	4.0**	0.6	97.6**
Zac vs Test	1	10187.8*	7908.5*	25.7**	2.5**	39.0**	255.7*	30.8**	145.4**	107.7*
Error	16	79.7	25.1	0.2	0.0	0.3	20.6	0.1	3.6	2.9
C.V.		4.1	4.2	7.1	5.5	5.6	6.2	5.2	5.0	13.1

Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Reps: repeticiones, Var: variedades, Zac: Ciclos de selección de Zacatecas 58, Test: Testigos, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP: rendimiento por planta (g), LM: longitud de la mazorca (cm), DM: diámetro de la mazorca (cm), NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número granos por hilera, PS: peso de cien semillas (g), IP: índice de prolificidad, DFM: días a floración masculina, AP: altura de planta (cm), AM: altura de mazorca (cm), HAM: hojas abajo de la mazorca, HARM: hojas arriba de la mazorca, NHT: número de hojas totales, LHM: longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM: ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE: longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE: número de ramas por espiga.

Cuadro 3A. Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de Zacatecas 58 y testigos en condiciones de Temporal, en campo CP-2010

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Reps	2	0.2	0.0	0.00	1.0	2.5	15.9	0.02	0.3
Var	7	281.7**	2.4	0.09**	2.3*	13.0*	2.5	0.02**	175.7**
Zac	6	64.7**	1.0	0.05	2.0	10.6	2.9	0.02**	192.0**
Test	1	249.6**	1.2	0.00	0.8	0.4	1.8	0.00	20.1**
Zac vs Test	1	1615.7**	11.9**	0.44**	5.4*	39.0*	0.9	0.08**	233.3*
Error	16	10.3	0.3	0.01	0.8	4.1	2.2	0.005	0.4
C.V.		7.7	5.5	3.39	6.5	8.6	8.9	8.1	0.9

Cuadro 3A. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Reps	2	72.5	18.6	0.03	0.004	0.1	14.1	0.1	5.2	3.0
Var	7	3138.3**	3026.9**	5.1**	0.5**	6.5**	176.2**	5.0**	34.6**	22.3**
Zac	6	2707.5**	2833.6**	4.6**	0.2**	5.1**	167.4**	2.2**	29.2**	4.6*
Test	1	3313.5**	2147.0**	2.8*	0.6*	0.8*	5.8	2.5*	0.8	96.8**
Zac vs Test	1	5548.3*	5066.6*	10.8*	2.0**	20.7**	398.8**	23.8**	101.2**	54.0**
Error	16	81.4	52.6	0.1	0.04	0.2	5.0	0.1	1.6	1.3
C.V.		4.4	6.7	6.1	5.7	5.0	3.0	4.5	3.5	10.6

FV: Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Reps: repeticiones, Var: variedades, Zac: Ciclos de selección de Zacatecas 58, Test: Testigos, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP: rendimiento por planta (g), LM: longitud de la mazorca (cm), DM: diámetro de la mazorca (cm), NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número granos por hilera, PS: peso de cien semillas (g), IP: índice de prolificidad, DFM: días a floración masculina. AP: altura de planta (cm), AM: altura de mazorca (cm), HAM: hojas abajo de la mazorca, HARM: hojas arriba de la mazorca, NHT: número de hojas totales, LHM: longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM: ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE: longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE: número de ramas por espiga

Cuadro 4A. Cuadros medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de Cafime y testigos en condiciones de riego, en campo CP-2010

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Reps	2	88.5	0.7	0.01	0.03	10.2	0.4	0.0	0.9
Var	7	5073.5**	2.0**	0.15*	3.5**	14.0**	30.1**	0.2**	63.7**
Caf	5	2302.8**	2.8**	0.10	2.1**	16.5**	39.7**	0.2**	64.6**
Test	1	169.6	0.1	0.54	4.5	0.04	0.2	0.1*	10.6*
Caf vs Test	1	23831.0**	0.0	0.04	9.8**	15.0	12.1	0.6**	112.5*
Error	14	64.6	0.3	0.04	0.3	2.0	5.8	0.01	0.3
C.V.		5.2	4.1	4.58	4.3	4.9	7.1	7.2	0.7

Cuadro 4A. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Reps	2	63.0	28.6	0.0	0.05	0.04	14.4	0.6	1.6	0.3
Var	7	987.1**	1124.4**	1.1**	0.3**	1.8**	67.1**	1.8**	31.0**	16.3**
Caf	5	836.5**	1206.1**	1.0**	0.1	1.5**	83.3**	0.7	36.8*	16.3**
Test	1	588.0**	807.3**	0.2	0.7**	0.02	38.0	0.006	4.6	19.0*
Caf vs Test	1	2139.6*	1032.8	2.4*	0.6*	4.7**	15.2	9.0**	27.5	14.0
Error	14	43.3	22.8	0.1	0.05	0.2	4.3	0.3	5.1	0.3
C. V.		2.6	3.1	4.3	5.1	3.5	2.2	6.3	5.6	5.0

FV: Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Reps: repeticiones, Var: variedades, Caf: Ciclos de selección de Cafime, Test: Testigos, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP: rendimiento por planta (g), LM: longitud de la mazorca (cm), DM: diámetro de la mazorca (cm), NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número granos por hilera, PS: peso de cien semillas (g), IP: índice de prolificidad, DFM: días a floración masculina, AP: altura de planta (cm), AM: altura de mazorca (cm), HAM: hojas abajo de la mazorca, HARM: hojas arriba de la mazorca, NHT: número de hojas totales, LHM: longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM: ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE: longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE: número de ramas por espiga.

Cuadro 5A. Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de Cafime y testigos en condiciones de sequía, en campo CP-2010.

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Reps	2	5.3	0.1	0.06	0.06	8.5	16.4	0.0	0.3
Var	7	2343.7**	2.5**	0.07	3.2**	14.0**	30.1**	0.1**	44.1
Caf	5	696.0**	3.1*	0.06	1.6*	14.2**	41.3*	0.1**	45.0**
Test	1	2886.4**	0.2	0.08	2.4	22.0*	0.0	0.06**	1.5**
Caf vs Test	1	10039.4**	1.8	0.10	12.0**	5.5	4.0	0.6**	82.3*
Error	23	23.3	0.6	0.05	0.3	1.6	6.5	0.0	0.2
C.V.		3.3	5.4	4.70	4.2	4.6	7.8	7.66	0.7

5A. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Reps	2	96.7	387.4	0.05	0.2	0.02	0.5	0.1	0.7	6.8
Var	7	1817.9**	1096.7*	3.5**	0.3**	3.1**	67.9**	2.7**	14.05	36.5**
Caf	5	1959.9**	1053.3	3.0**	0.0	3.0**	94.8**	1.0	17.6**	29.5**
Test	1	365.0	1093.5**	1.7	2.1**	0.1	0.08	4.0**	0.6	97.6**
Caf vs Test	1	2560.9*	1316.7	7.8*	0.2	6.7*	0.8	9.8**	9.7	10.8
Error	23	31.9	311.0	0.3	0.1	0.3	8.5	0.4	2.9	3.1
C.V		2.4	12.9	7.8	5.5	4.8	3.7	7.3	4.2	9.8

FV: Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Reps: repeticiones, Var: variedades, Caf: Ciclos de selección de Cafime, Test: Testigos, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP: rendimiento por planta (g), LM: longitud de la mazorca (cm), DM: diámetro de la mazorca (cm), NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número granos por hilera, PS: peso de cien semillas (g), IP: índice de prolificidad, DFM: días a floración masculina, AP: altura de planta (cm), AM: altura de mazorca (cm), HAM: hojas abajo de la mazorca, HARM: hojas arriba de la mazorca, NHT: número de hojas totales, LHM: longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM: ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE: longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE: número de ramas por espiga

Cuadro 6A. Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de Cafime y testigos en condiciones de temporal, en campo CP-2010.

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Reps	2	11.4	0.02	0.02	0.6	4.2	0.2	0.02	0.1
Var	7	284.8**	1.1*	0.03	4.4**	9.2**	12.5**	0.02	45.1**
Caf	5	60.4**	1.2*	0.04	3.2*	8.5*	15.5**	0.02	57.7**
Test	1	249.6**	1.2	0.00	0.8	0.4	1.8	0.00	20.1**
Caf vs Test	1	1441.8**	1.0	0.01	13.8**	21.9*	8.6	0.04	6.7
Error	14	7.0	0.2	0.01	0.7	1.7	1.9	0.01	0.3
C.V.		6.2	4.8	3.45	6.1	5.3	7.7	11.30	0.7

Cuadro 6A. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Reps	2	150.6	19.3	0.06	0.1	0.01	0.7	0.3	0.6	0.4
Var	7	1042.6**	1164.5**	1.5**	0.2	2.0**	61.5**	2.3**	15.3**	33.2**
Caf	5	473.3*	1010.6**	1.0**	0.1	1.7**	84.8*	1.1**	21.3**	27.1**
Test	1	3313.5**	2147.0**	2.8*	0.6*	0.8*	5.8	2.5*	0.8	96.8**
Caf vs Test	1	1617.8*	951.2	2.3*	0.4*	5.0**	0.3	8.2**	0.02	0.4
Error	14	108.1	50.5	0.1	0.04	0.1	12.0	0.1	2.1	1.1
C.V.		4.8	5.8	6.9	5.0	3.8	4.2	3.9	3.6	7.8

FV: Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Reps: repeticiones, Var: variedades, Caf: Ciclos de selección de Cafime, Test: Testigos, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP: rendimiento por planta (g), LM: longitud de la mazorca (cm), DM: diámetro de la mazorca (cm), NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número granos por hilera, PS: peso de cien semillas (g), IP: índice de prolificidad, DFM: días a floración masculina, AP: altura de planta (cm), AM: altura de mazorca (cm), HAM: hojas abajo de la mazorca, HARM: hojas arriba de la mazorca, NHT: número de hojas totales, LHM: longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM: ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE: longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE: número de ramas por espiga.

Cuadro 7A. Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de dos genotipos Zacatecas 58, Cafime y testigos en condiciones de riego, en campo CP-2010.

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Reps	2	168.5	0.8	0.01	0.04	1.5	0.5	0.01	0.68
Var	14	6161.0**	3.5**	0.22**	2.7**	13.4**	50.0**	0.24**	131.6**
Genotipos	13	3794.8**	3.8**	0.17**	2.3**	13.7**	56.8**	0.22**	126.8**
Test	1	169.6	0.1	0.54	4.5	0.04	0.2	0.08*	10.6*
Gen vs Test	1	40547.3**	2.3	0.42*	6.6*	22.4	18.0	0.66**	309.7**
Error	28	118.3	0.3	0.03	0.3	2.4	4.1	0.02	0.4
C.V.		8.3	4.0	4.34	3.9	5.5	6.5	11.7	0.9

Cuadro 7 A. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Reps	2	1.2	10.0	0.3	0.08	0.43	4.6	0.07	0.1	0.7
Var	14	2485.2**	2723.1**	3.1**	0.5**	5.6**	234.2**	2.07**	32.2**	13.7**
Genotipos	13	2422.0**	2765.2**	3.0**	0.4**	5.2**	261.8**	1.0*	30.8**	14.3**
Test	1	588.0**	807.3**	0.2	0.7**	0.03	38.0	0.006	4.6	19.0*
Gen vs Test	1	5140.4*	4133.7*	8.7**	1.4**	16.1**	99.6	16.6**	76.4*	1.3
Error	28	46.2	18.9	0.1	0.05	0.21	8.2	0.38	3.4	0.6
C.V.		2.8	3.1	5.6	5.4	4.0	3.2	7.6	4.8	7.5

FV: Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Reps: repeticiones, Var: variedades, Genotipos: Zacatecas 58 y Cafime, Test: Testigos, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP: rendimiento por planta (g), LM: longitud de la mazorca (cm), DM: diámetro de la mazorca (cm), NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número granos por hilera, PS: peso de cien semillas (g), IP: índice de prolificidad, DFM: días a floración masculina, AP: altura de planta (cm), AM: altura de mazorca (cm), HAM: hojas abajo de la mazorca, HARM: hojas arriba de la mazorca, NHT: número de hojas totales, LHM: longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM: ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE: longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE: número de ramas por espiga

Cuadro 8A. Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de dos genotipos Zacatecas 58, Cafime y testigos en condiciones de sequía, en campo CP-2010

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Reps	2	9.5	0.1	0.02	0.1	16.1	17.5	0.02	1.4
Var	14	3767.6**	5.4**	0.27**	2.3**	18.2**	40.2**	0.14**	130.3**
Genotipos	12	2464.8**	5.5**	0.24**	1.4**	18.4**	45.2**	0.10**	129.4**
Test	1	2886.4**	0.2	0.08	2.4	22.0*	0.006	0.06**	1.5**
Gen vs Test	1	20282.5**	9.5*	0.80**	12.4**	11.6	21.1	0.70**	268.9*
Error	28	41.1	0.5	0.03	0.4	1.8	5.8	0.01	0.2
C.V.		5.0	5.6	4.40	4.6	4.9	8.1	8.22	0.7

Cuadro 8A. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Reps	2	34.2	149.3	0.1	0.1	0.2	3.1	0.7	0.8	2.1
Var	14	3736.1**	3055.5**	5.3**	0.6**	8.1**	140.3**	3.5**	48.6**	65.4**
Genotipos	12	3761.5**	3082.0**	4.5**	0.4**	7.5**	156.1**	2.0**	50.8**	66.6**
Test	1	365.0	1093.5**	1.7	2.1**	0.1	0.1	4.0**	0.6	97.6**
Gen vs Test	1	6802.7*	4699.2*	18.2**	1.2*	23.4**	91.3	22.1**	70.6*	18.2
Error	28	70.7	187.0	0.2	0.1	0.3	15.3	0.2	3.2	3.5
C.V.		3.8	11.1	8.0	5.8	5.4	5.2	6.5	4.6	12.5

FV: Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Reps: repeticiones, Var: variedades, Genotipos: Zacatecas 58 y Cafime, Test: Testigos, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP: rendimiento por planta (g), LM: longitud de la mazorca (cm), DM: diámetro de la mazorca (cm), NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número granos por hilera, PS: peso de cien semillas (g), IP: índice de prolificidad, DFM: días a floración masculina, AP: altura de planta (cm), AM: altura de mazorca (cm), HAM: hojas abajo de la mazorca, HARM: hojas arriba de la mazorca, NHT: número de hojas totales, LHM: longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM: ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE: longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE: número de ramas por espiga.

Cuadro 9A. Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de dos genotipos Zacatecas 58, Cafime y testigos en condiciones de temporal, en campo CP-2010

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Reps	2	1.5	0.1	0.0	0.05	4.4	6.3	0.03	0.1
Var	14	191.6**	2.3**	0.1**	3.1**	10.4**	9.3**	0.02**	135.1**
Genotipos	12	57.9**	2.0**	0.1**	2.7*	9.2*	10.6**	0.02**	147.7**
Test	1	249.6**	1.2	0.0	0.8	0.4	1.8	0.00	20.1**
Gen vs Test	1	1737.7**	6.0*	0.2*	10.0*	34.5*	0.8	0.07*	99.3
Error	28	8.6	0.3	0.0	0.8	3.1	2.5	0.01	0.4
C.V.		7.3	5.3	3.4	6.7	7.5	9.0	9.52	0.9

Cuadro 9A. Continuación.

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Reps	2	229.7	2.5	0.0	0.0	0.0	7.3	0.3	3.2	3.4
Var	14	2010.0**	2185.5**	3.5**	0.3**	4.6**	174.1**	3.4**	38.0**	29.2**
Genotipos	12	1745.5**	2111.7**	3.2**	0.2**	4.1**	192.5**	2.3**	41.6**	24.8**
Test	1	3313.5**	2147.0**	2.8*	0.6*	0.8*	5.8	2.5*	0.8	96.8**
Gen vs Test	1	3880.6*	3109.2*	6.9*	1.3**	13.7**	122.0	17.6**	31.7	14.6
Error	28	98.5	57.3	0.1	0.0	0.2	9.2	0.1	2.0	1.2
C.V.		4.8	6.8	6.5	5.7	4.4	3.9	4.5	3.8	9.5

FV: Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Reps: repeticiones, Var: variedades, Genotipos: Zacatecas 58 y Cafime, Test: Testigos, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP: rendimiento por planta (g), LM: longitud de la mazorca (cm), DM: diámetro de la mazorca (cm), NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número granos por hilera, PS: peso de cien semillas (g), IP: índice de prolificidad, DFM: días a floración masculina, AP: altura de planta (cm), AM: altura de mazorca (cm), HAM: hojas abajo de la mazorca, HARM: hojas arriba de la mazorca, NHT: número de hojas totales, LHM: longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM: ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE: longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE: número de ramas por espiga.

Cuadro 10A. Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de dos genotipos Zacatecas 58 y Cafime en condiciones de riego, en campo CP-2010.

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Reps	2	154.4	0.8	0.01	0.1	1.0	1.8	0.01	0.4
Var	12	3794.8**	3.8**	0.17**	2.3**	13.7**	56.8**	0.22**	126.8**
Zac	6	4326.6**	2.5**	0.08	2.1**	13.3**	12.0*	0.3**	158.6**
Caf	5	2302.8**	2.8**	0.09	2.1**	16.5**	39.7**	0.18**	64.6**
Zac vs Caf	1	8064.0*	16.7**	1.14**	4.0*	2.1	411.5**	0.0004	246.9*
Error	24	135.1	0.2	0.03	0.2	2.2	4.2	0.02	0.4
C.V.		9.8	4.0	4.09	3.7	5.3	6.6	13.0	1.0

10A. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Rep	2	1.4	14.1	0.4	0.1	0.5	5.0	0.03	0.04	1.2
Var	12	2422.0**	2765.2**	3.0**	0.4**	5.2**	261.8**	1.0*	30.8**	14.3**
Zac	6	3629.8**	3577.1**	3.3**	0.5**	6.1**	238.8**	0.6	20.6**	6.2**
Caf	5	836.4**	1206.1**	1.0**	0.1	1.5**	83.3**	0.7	36.8*	16.3**
Zac vs Caf	1	3103.5	5688.5*	10.4**	0.8*	18.4**	1292.0**	4.6**	62.0*	53.2**
Error	24	53.8	21.6	0.1	0.0	0.2	8.2	0.4	4.0	0.6
C.V.		3.1	3.5	6.0	5.7	4.3	3.2	8.3	5.2	7.5

FV: Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Reps: repeticiones, Var: variedades, Zac: ciclos de selección de Zacatecas 58, Caf: ciclos de selección de Cafime, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP: rendimiento por planta (g), LM: longitud de la mazorca (cm), DM: diámetro de la mazorca (cm), NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número granos por hilera, PS: peso de cien semillas (g), IP: índice de prolificidad, DFM: días a floración masculina, AP: altura de planta (cm), AM: altura de mazorca (cm), HAM: hojas abajo de la mazorca, HARM: hojas arriba de la mazorca, NHT: número de hojas totales, LHM: longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM: ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE: longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE: número de ramas por espiga.

Cuadro 11 A. Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de dos genotipos Zacatecas 58 y Cafime en condiciones de Sequía, en campo CP-2010

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Reps	2	11.6	0.04	0.004	0.01	16.1	16.9	0.01	1.0
Var	12	2464.8**	5.5**	0.24**	1.4**	18.4**	45.2**	0.11**	129.4**
Zac	6	3058.9**	5.6**	0.15**	1.5	24.3**	7.0	0.15**	174.1**
Caf	5	696.0**	3.1*	0.06	1.6*	14.2**	41.3*	0.08**	45.0**
Zac vs Caf	1	7744.2**	16.8**	1.6**	0.25	5.0	293.3**	0.01	283.9**
Error	24	46.1	0.6	0.04	0.4	2.0	6.7	0.01	0.3
C.V.		5.8	6.0	4.64	4.6	5.2	8.7	8.82	0.8

Cuadro 11A. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Reps	2	24.1	169.1	0.1	0.07	0.1	5.2	1.1	3.5	2.3
Var	12	3761.5**	3082.0**	4.5**	0.4**	7.5**	156.1**	1.9**	50.8**	66.6**
Zac	6	5045.1**	4351.1**	4.8**	0.3**	8.0**	155.0**	1.1**	59.7**	43.5**
Caf	5	1959.9**	1053.3	3.0**	0.05	3.0**	94.8**	1.0	17.6**	29.5**
Zac vs Caf	1	5068.6*	5611.2*	10.2*	2.8**	26.8**	469.2**	11.5**	163.8**	391.4**
Error	24	79.1	216.2	0.3	0.07	0.3	16.7	0.2	3.0	4.1
C.V.		4.1	12.31	8.9	6.0	5.6	5.5	6.6	4.5	13.6

FV: Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Reps: repeticiones, Var: variedades, Zac: ciclos de selección de Zacatecas 58, Caf: ciclos de selección de Cafime, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP: rendimiento por planta (g), LM: longitud de la mazorca (cm), DM: diámetro de la mazorca (cm), NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número granos por hilera, PS: peso de cien semillas (g), IP: índice de prolificidad, DFM: días a floración masculina, AP: altura de planta (cm), AM: altura de mazorca (cm), HAM: hojas abajo de la mazorca, HARM: hojas arriba de la mazorca, NHT: número de hojas totales, LHM: longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM: ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE: longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE: número de ramas por espiga.

Cuadro 12A. Cuadrados medios del análisis de varianza para diecisiete variables en la evaluación de dos genotipos Zacatecas 58 y Cafime en condiciones de temporal, en campo CP-2010.

F.V	G.L	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Rep	2	0.3	0.1	0.002	0.01	2.7	2.9	0.01	0.18
Var	12	58.0**	2.0**	0.10**	2.7**	9.2*	10.6**	0.02**	147.7**
Zac	6	64.7**	1.0	0.05	2.0	10.6	2.9	0.02**	192.0**
Caf	5	60.4**	1.2*	0.04	3.2*	8.5*	15.5**	0.02	57.7**
Zac vs Caf	1	4.8	12.3**	0.61**	4.4	4.5	32.4*	0.01	331.6**
Error	24	8.3	0.3	0.01	0.9	3.4	2.6	0.006	0.4
C.V.		7.7	5.5	3.53	6.9	8.0	9.2	8.93	0.9

12A. Continuación

F.V	G.L	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Reps	2	260.3	1.4	0.1	0.007	0.04	10.1	0.2	1.9	4.1
Var	12	1745.5**	2111.7**	3.2**	0.26**	4.1**	192.5**	2.3**	41.6**	24.8**
Zac	6	2707.5**	2833.6**	4.6**	0.2**	5.1**	167.4**	2.2**	29.2**	4.6*
Caf	5	473.3*	1010.6**	1.1**	0.1	1.7**	84.8*	1.1**	21.3**	27.1**
Zac vs Caf	1	2334.5	3285.4*	6.1*	1.1**	10.7**	881.0**	8.0**	217.3**	134.8**
Error	24	110.5	66.4	0.1	0.05	0.1	10.3	0.2	2.3	1.3
C.V.		5.2	7.5	6.3	5.84	4.4	4.1	5.0	4.0	10.0

FV: Fuente de variación, g.l.: Grados de libertad, Reps: repeticiones, Var: variedades, Zac: ciclos de selección de Zacatecas 58, Caf: ciclos de selección de Cafime, *, **Significativo al 5% ($p \leq 0.05$) y al 1% ($p \leq 0.01$), respectivamente; RPP: rendimiento por planta (g), LM: longitud de la mazorca (cm), DM: diámetro de la mazorca (cm), NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número granos por hilera, PS: peso de cien semillas (g), IP: índice de prolificidad, DFM: días a floración masculina, AP: altura de planta (cm), AM: altura de mazorca (cm), HAM: hojas abajo de la mazorca, HARM: hojas arriba de la mazorca, NHT: número de hojas totales, LHM: longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM: ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE: longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE: número de ramas por espiga.

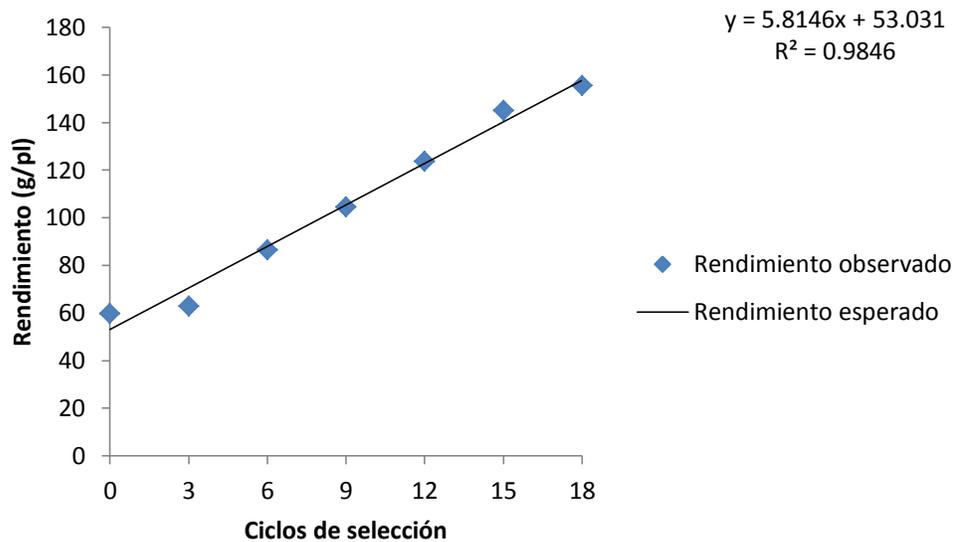


Figura 1A. Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de zacatecas 58 en condiciones de riego.

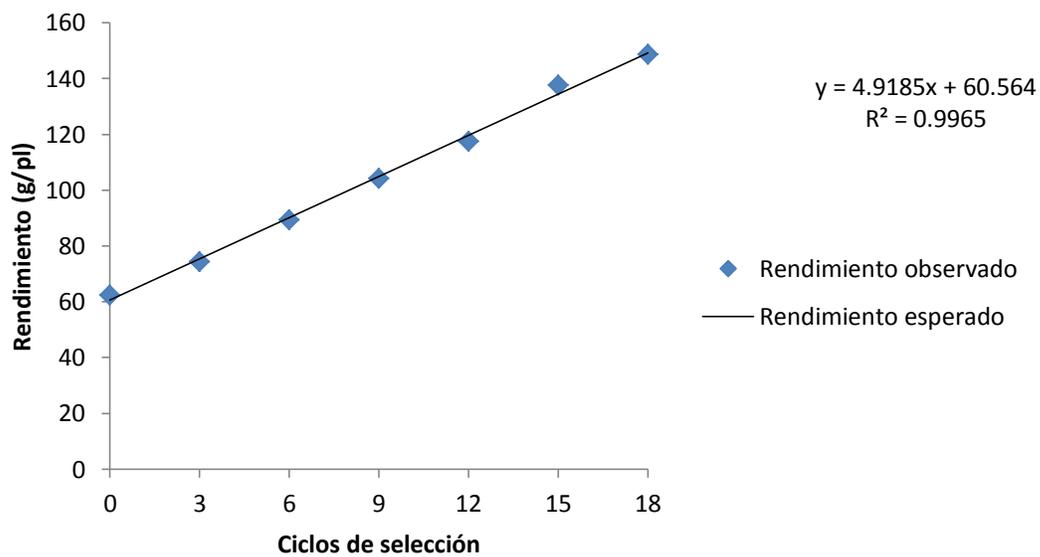


Figura 2A. Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de zacatecas 58 en condiciones de sequía.

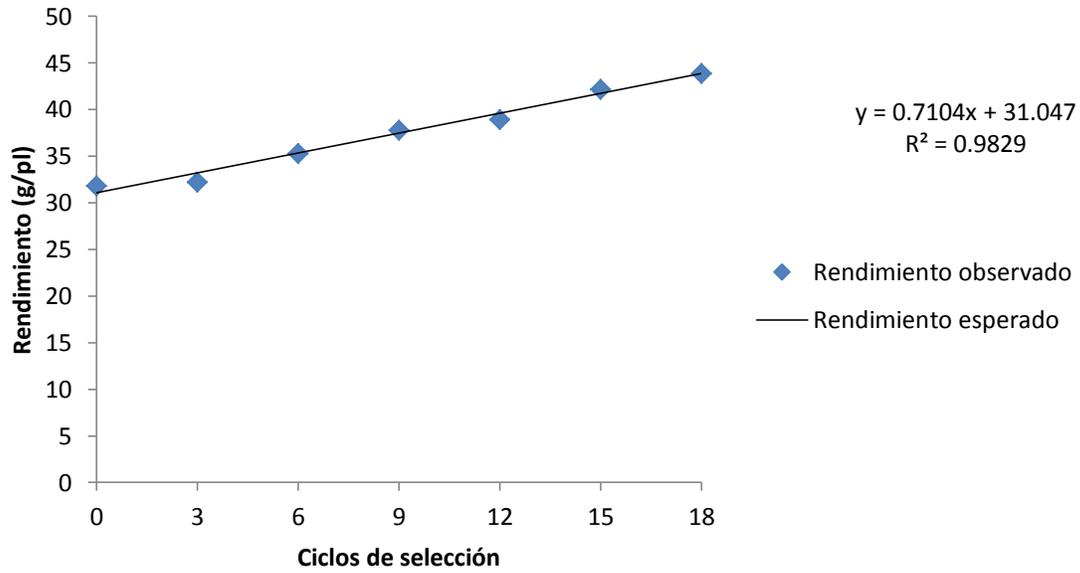


Figura 3A. Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de zacatecas 58 en condiciones de temporal.

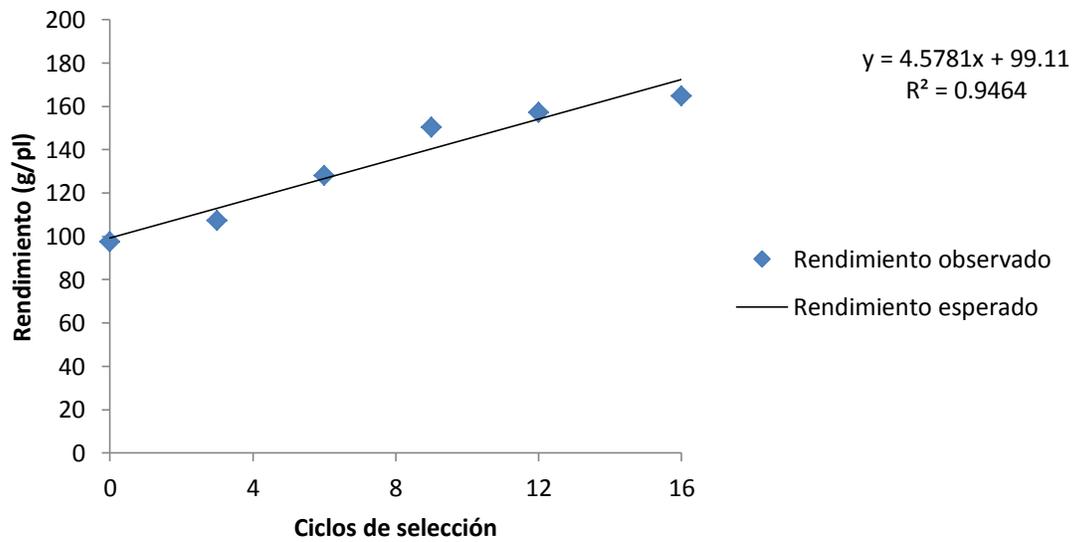


Figura 4A. Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de Cafime en condiciones de riego.

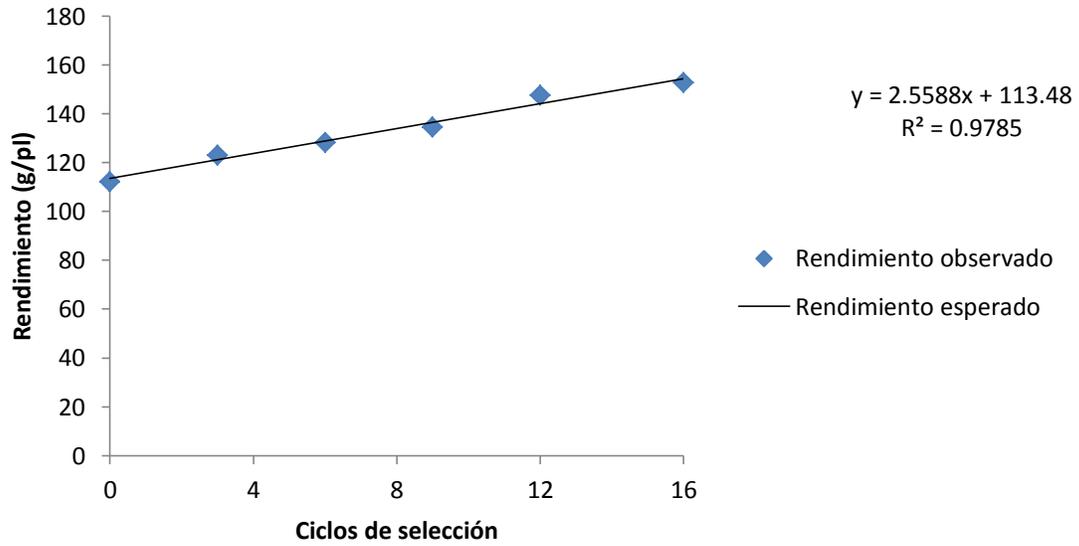


Figura 5A. Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de Cafime en condiciones de sequía.

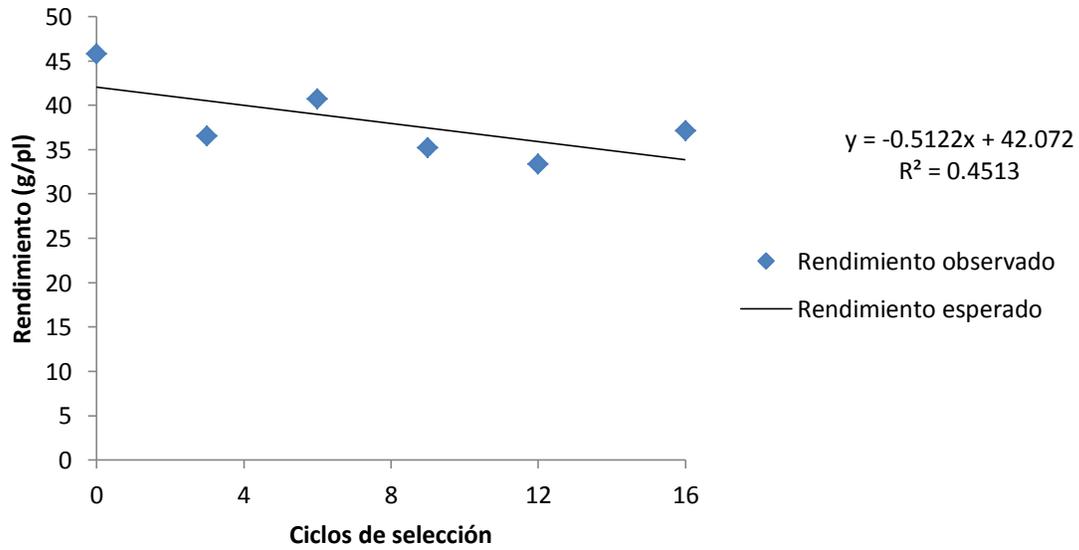


Figura 6A. Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de Cafime en condiciones de temporal.

Cuadro 13A. Promedios generales por ambiente de diecisiete caracteres de los ciclos de selección de Zacatecas 58 más testigos. CP 2010, Montecillo México.

Ambientes	Componentes del rendimiento							
	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Riego	127.94	12.80	4.38	14.28	28.46	29.07	1.27	68.18
Sequía	121.61	13.14	4.43	14.02	27.09	28.12	1.27	67.62
Temporal	41.57	10.17	3.84	14.26	23.66	16.83	0.89	71.66

Cuadro 13 A. Continuación

Ambientes	Caracteres agronómicos								
	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Riego	238.98	131.64	6.88	4.29	11.13	85.23	8.09	38.19	9.39
Sequía	217.32	117.44	6.30	4.25	10.41	73.22	7.92	37.80	12.99
Temporal	202.94	107.05	5.49	3.86	9.42	75.02	8.22	36.57	10.73

RPP: rendimiento por planta (g), LM: longitud de la mazorca (cm), DM: diámetro de la mazorca (cm), NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número granos por hilera, PS: peso de cien semillas (g), IP: índice de prolificidad, DFM: días a floración masculina, AP: altura de planta (cm), AM: altura de mazorca (cm), HAM: hojas abajo de la mazorca, HARM: hojas arriba de la mazorca, NHT: número de hojas totales, LHM: longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM: ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE: longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE: número de ramas por espiga.

Cuadro 14 A. Promedios generales por ambiente de diecisiete caracteres de los ciclos de selección de Cafime más testigos. CP 2010, Montecillo México.

Ambientes	Componentes del rendimiento							
	RPP	LM	DM	NHM	NGH	PS	IP	DFM
Riego	152.40	13.82	4.65	13.82	28.88	34.10	1.28	72.25
Sequía	144.90	14.18	4.75	13.94	27.68	32.37	1.30	71.95
Temporal	42.62	11.06	4.04	13.78	24.26	18.22	0.92	76.25

Cuadro 14 A. Continuación

Ambientes	Caracteres agronómicos								
	AP	AM	HAM	HARM	NHT	LHM	AHM	LRE	NRE
Riego	253.50	150.90	7.71	4.54	12.23	94.16	8.67	40.22	11.17
Sequía	235.77	136.63	7.14	4.68	11.74	78.65	8.80	41.04	17.89
Temporal	215.54	121.78	6.13	4.13	10.27	82.43	8.97	40.25	13.63

RPP: rendimiento por planta (g), LM: longitud de la mazorca (cm), DM: diámetro de la mazorca (cm), NHM: número de hileras por mazorca, NGH: número granos por hilera, PS: peso de cien semillas (g), IP: índice de prolificidad, DFM: días a floración masculina, AP: altura de planta (cm), AM: altura de mazorca (cm), HAM: hojas abajo de la mazorca, HARM: hojas arriba de la mazorca, NHT: número de hojas totales, LHM: longitud de hoja de la mazorca (cm), AHM: ancho de hoja de la mazorca (cm), LRE: longitud de la rama primaria de la espiga (cm), NRE: número de ramas por espiga.

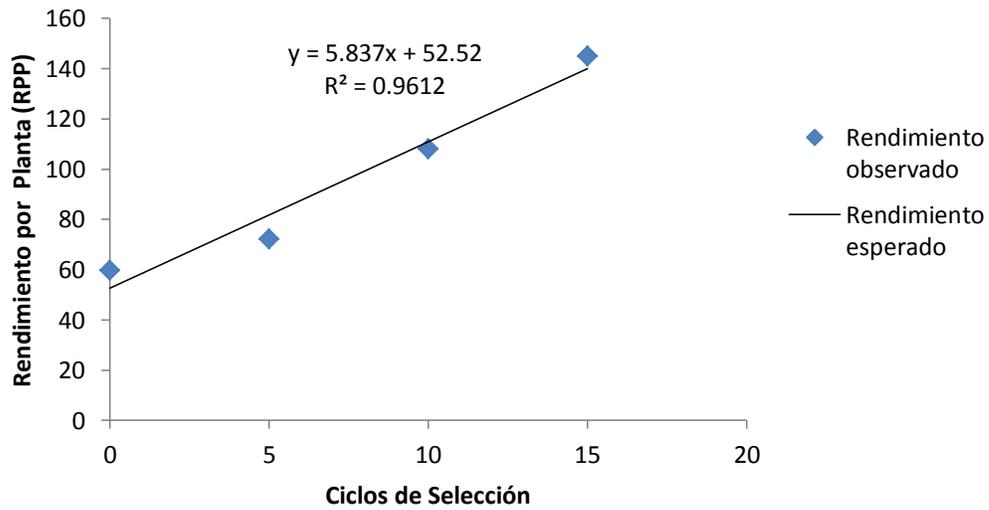


Figura 7A. Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de zacatecas 58 en condiciones de riego.

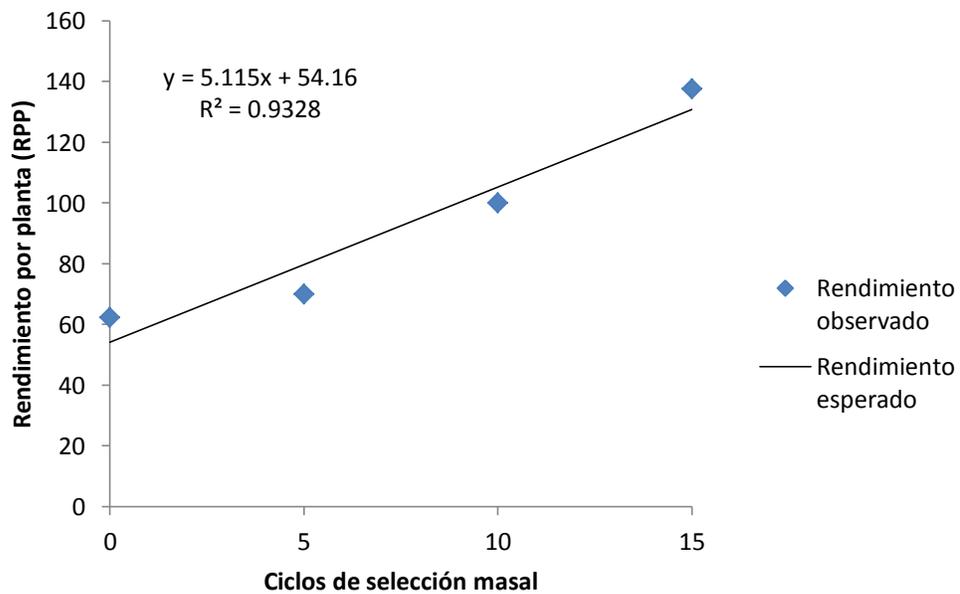


Figura 8A. Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de zacatecas 58 en condiciones de sequía.

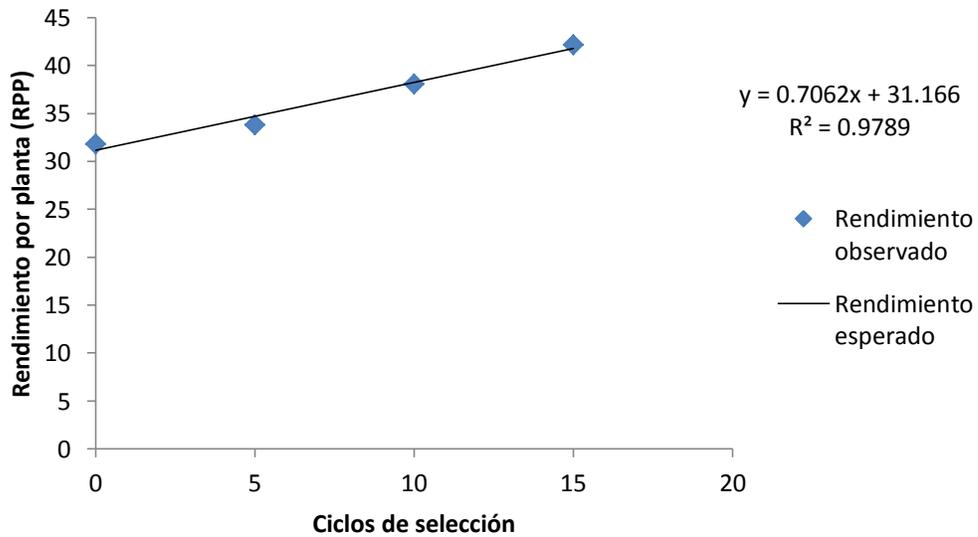


Figura 9A. Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de zacatecas 58 en condiciones de temporal.

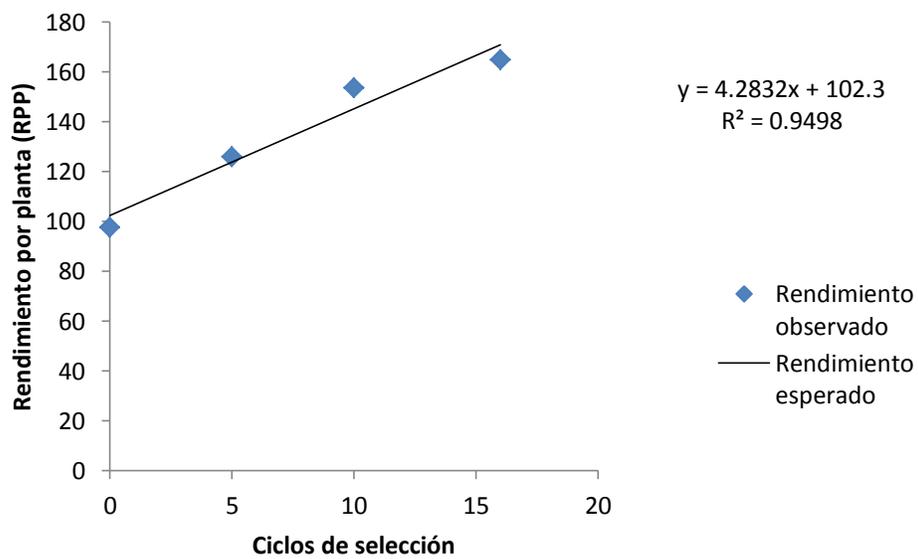


Figura 10A. Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de Cafime en condiciones de riego.

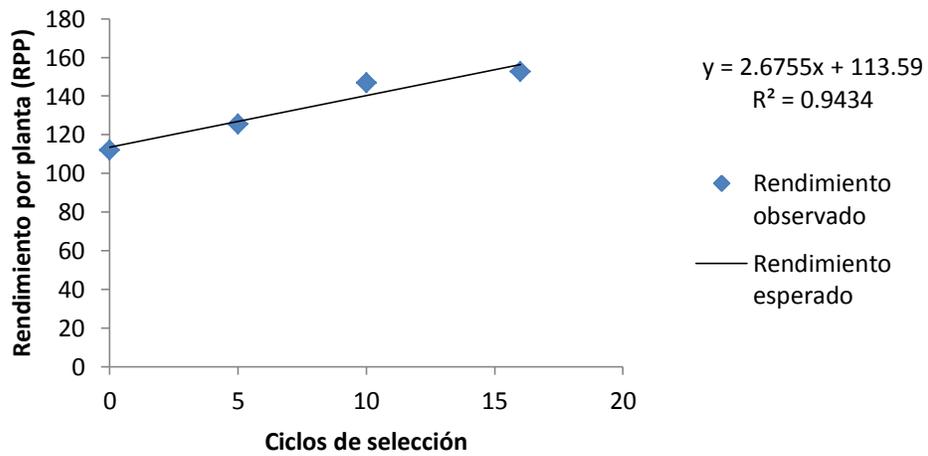


Figura 11A. Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de Cafime en condiciones de sequía.

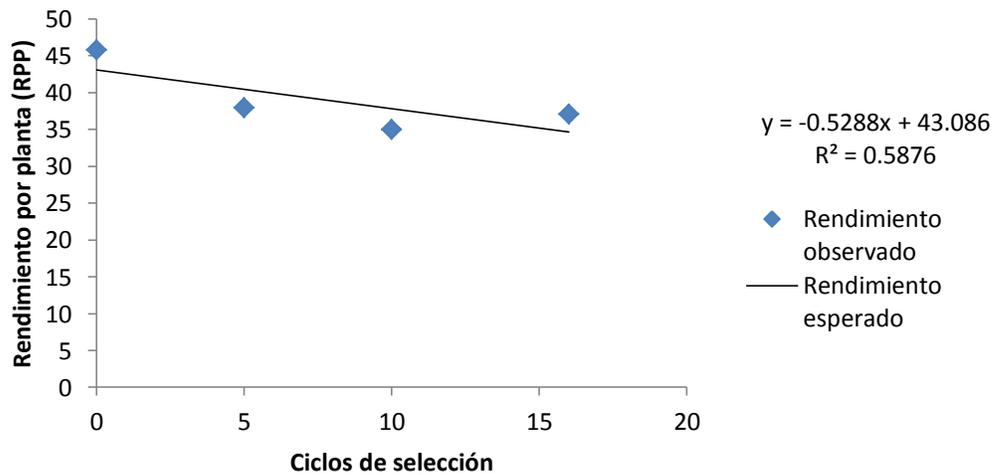


Figura 12A. Regresión del rendimiento en los ciclos de selección de Cafime en condiciones de temporal.